

令和元年6月14日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05097

研究課題名(和文) 深部花崗岩中のミュオン生成核種による300万年前の超新星残骸通過時の宇宙線探索

研究課題名(英文) Search for cosmic rays related to supernova remnants in the past of 3 million years using muon induced cosmogenic nuclides in granite rocks at a deep underground

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) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：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によって大気中で生成された高エネルギーミュオンが花崗岩の石英中に生成し蓄積した宇宙線生成核種Be-10(半減期約140万年)の濃度を加速器質量分析法により測定した。得られた深度5m、20m、50mにおけるBe-10の濃度分布と半減期、現在の高エネルギー宇宙線スペクトルを用いて過去数百万年の銀河系内高エネルギー宇宙線強度の変動を実験値により議論することが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

国際的に見ても50mの深度での実験データは、2例程度の先行研究しかない。且つ、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。

本研究の結果は、現代の高エネルギー宇宙線ミュオンスペクトルから推定されるBe-10濃度に比べ高エネルギー側で変化している可能性を示唆しており過去の高エネルギー宇宙線スペクトルを調べる上で重要な研究成果である。

研究成果の概要(英文)：Secular variations of galactic cosmic rays (GCRs) are associated with the occurrence of supernova explosions, the confinement of cosmic rays in supernova remnants, and the propagation of cosmic rays in the galaxy. The high-energy muons produced in the atmosphere by high-energy GCRs can penetrate deep underground. Since rocks deep underground have been exposed to high-energy muons over a long period of time, the muon-induced radioisotope Be-10 with the half-life of 1.36×10^6 yrs have been accumulating there. In rocks more than 50 m underground, these nuclides are mainly produced by muons with energies above 100 GeV, corresponding to GCRs of a few TeV. We have measured the Be-10 concentrations at the depths of 5m, 20m, and 50m by AMS, employing Toki granite boring core sample. There are a few publications containing data on the Be-10 concentrations in rocks at depths. The results play an important role to discuss experimentally the spectral variability of GCRs over a few million years.

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

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙線の永年変化は、超新星の出現頻度および宇宙線の銀河円盤内の閉じ込めとその滞在時間に密接に関係している。宇宙線の原子核組成から宇宙線の平均滞在時間は約 100 万年と考えられているが、数百万年のスケールでの宇宙線強度変動の実験測定データはほとんど無い。特に高エネルギー宇宙線の永年変化の実験的研究は未知である。

(2) 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の近くにあり、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。300 万年では約 800 pc (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 ~ 1000 万年で誕生を繰り返す OB 型星が集まっており、太陽系はスパイラルアームに突入し超新星残骸と遭遇する確率が高いと考えられる。

(3) 深海底 (4830 m) のマンガクラスト中に元素 Fe-60 ($T_{1/2} = 2.6 \times 10^6 \text{ yr}$) が 280 万年前に異常増加していて、これは数 10 パーセック (1 パーセックは 3.26 光年) の距離での超新星爆発による放出物であるという報告があり (Knie et al., P.R.L., 93, 2004, Rugei et al., P.R.L., 103, 2009)、ドイツの AMS 測定グループを中心にこの痕跡の探索が精力的に進められている (AMS13 加速器質量分析国際会議@provence, 2014 August)。Fe-60 は地球上では極めて生成されにくい元素であり、星の元素合成が生成源であることから、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 Fe-60 が地球上への降下物として海底に堆積されたものと考えられた。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が推定でき、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された。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。

(4) 数 10 GeV から数 10 TeV の高エネルギー宇宙線スペクトルの精密観測は、われわれの近傍の超新星残骸達からの宇宙線の伝播が要因として考えられている (Yoon et al., Ap J, 728:122, 2011, Bernard et al., A&A 555, A48 (2013))。一方、チベットでの宇宙線観測から数 TeV から数 100 TeV の宇宙線は、銀河系アームにかなりよくまきついていることが分かってきた (Amenomori et al., Science 314, pp439, 2006)。しかし、1 千万年のスケールに渡って地球に飛来する高エネルギー宇宙線が定常であるかは未知である。それゆえ、高エネルギー宇宙線によって大気で生成される高エネルギーミュオンが地下深部の岩石に残した痕跡の測定は、過去の宇宙線スペクトルの直接探索として重要である。

2. 研究の目的

(1) 100 GeV を超える高エネルギー宇宙線ミュオンが地下深部の岩石中に生成する長半減期の宇宙線生成核種 Al-26 (72 万年), Be-10 (136 万年) などを加速器質量分析法 (AMS) により測定して、過去数百万年間の高エネルギー宇宙線強度および宇宙線スペクトルの変動について探索することを目的としている。

(2) 1 億年前に形成され 1 千万年前に岩体上部が堆積物で覆われた土岐花崗岩は、1 千万年の間、一定の状態地球に入射してくる宇宙線変動を記録している。この花崗岩を試料として高エネルギーミュオンにより生成される生成核種の深度特性を調べる。

3. 研究の方法

(1) 超新星残骸における宇宙線加速について調べるためには 1 TeV を超える高エネルギー宇

宙線のスペクトルを観測することが重要である。低エネルギー銀河宇宙線は、地球に到達するまでに銀河磁場による拡散や太陽圏における太陽風磁場の変調の影響が大きく、発生源や伝播の情報が薄められてしまうためである。過去数百万年の宇宙線強度変動を探索するために、高エネルギー宇宙線が大気中で生成し地下深部に到達する高エネルギーミュオンの痕跡を用いる。高エネルギーミュオンは、地下岩石中の酸素やケイ素の核破砕反応により Al-26 や Be-10などを生成し岩石中に過去の宇宙線強度変動を記録する。

(2) 岩石試料は、堅牢な石英が多く含まれる花崗岩が最適である。高エネルギーミュオンは、石英中に宇宙線生成核種を生成し蓄積している。

本研究で使用する土岐花崗岩は、東濃地科学センターが採掘した深度 1000mのボーリングコアであり、本研究のために提供されたものである(写真 1)。土岐花崗岩体は、地表部で直径約 13km の円形の深成岩体であり白亜紀後期にマグマが固まって約 7 千万年前に形成され、沈降・隆起後 1 千万年前より安定して現在の状態にある(湯口他, 岩石鉱物科学



写真 1 . 土岐花崗岩ボーリングコアサンプル (5m)

39, 2010)。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岩体であり、過去 1 千万年の宇宙線スペクトル変動を探索するための最適な試料である。

(3) 高エネルギーミュオンによって石英中に生成される Be-10 は、地下 50m 深度での Be-10 の濃度は数 1000 atoms/ (g 石英) 程度と見積もられ、深度に依存するが数 kg 程度までの花崗岩試料の大量処理が必要となる。このため試料の効率的処理の開発を行った。

(4) 土岐花崗岩からの石英選別と抽出は山形大学で行い、石英試料から Be-10 を抽出し加速器質量分析のための測定試料の作成は弘前大学で行った。加速器質量分析測定は東京大学 MALT タンデム加速器により行った。

4 . 研究成果

(1) 石英抽出のための SPT 重液 (ポリタングステン酸ナトリウム) 分離

花崗岩試料は、SPT 分離および石英抽出作業を考慮して粉砕して篩によりサイズが 250 μm ~ 500 μm の試料を取り出した。磁性分離により有色鉱物を除去し、石英および長石の混合物に対して SPT 重液を用いて石英と長石の比重の違いを利用した分離を行った (写真 2, 3, 4)。

深度 50m の土岐花崗岩試料約 3.5kg から 250 μm ~ 500 μm の試料を

1.24kg 篩分けした後磁性分離し、約 92.3% の石英と長石の混合物 1.145kg について SPT 分離を行った。1 回目 SPT 分離で得られた石英沈殿物は 0.554kg (48.4%) であり、さらに 1 回目石英沈殿物を 2 回目 SPT 分離により得られた石英沈殿物は 0.394kg (71%) であった。土岐花崗岩の石英の割合を 30% とすると、2 回の SPT 分離により約 2.4 倍の石英濃縮ができることが分かった。これにより AMS 測定用試料作成の効率が 2 倍以上向上した。

SPT 分離後の石英沈殿物は、塩酸処理により鉄酸化物や炭酸塩鉱物など

土岐石英	wt. %
TiO ₂	-0.023
Al ₂ O ₃	-0.173
Fe ₂ O ₃	0.018
MnO	0.000
MgO	-0.078
CaO	-0.002
Na ₂ O	0.016
K ₂ O	-0.300
P ₂ O ₅	-0.045

を除去し、さらにフッ酸処理により石英以外の珪酸塩および石英表面の大気起源宇宙線生成核種の洗浄を行う。表は、抽出石英中の微量元素成分についての X-線分析結果であり、高純度の石英が得られていることが分かる。



写真 2 . SPT 分離の様子。石英沈殿物と長石浮遊物



写真 3 . 石英沈殿物



写真 4 . 長石浮遊物

(2) 土岐花崗岩の石英中の Be-10 濃度

深度 5 m、2 0 m、5 0 mにおける土岐花崗岩コア試料の Be-10 濃度を測定した。深度 5 m、2 0 mの分析処理に使用した篩選別後の花崗岩試料量は、各々0.079kg、0.401kgであった。

図 1 に土岐花崗岩の AMS 測定結果を示す。50m の Be-10 濃度は、5m の約 13%である。Phits を用いた花崗岩への入射ミュオンエネルギーと Be-10 生成量の深度分布は、50m では 100GeV を超える高エネルギーミュオンによる生成が卓越してくることを示しており、50m での Be-10 濃度は 100GeV 以上の高エネルギーミュオンによる生成量の蓄積であると考えられる。

図 1 は、宇宙線によって大気中で生成される中性子およびミュオンによる花崗岩中 Be-10 生成量からの計算値を合わせて示している。蓄積量は現在の宇宙線スペクトルによる中性子およびミュオンのスペクトルに対して平衡状態を仮定した計算値である。1m 以下の深度での主要生成寄与粒子が中性子であることを示している。また、同様に図 1 に 100GeV よりも低エネルギー宇宙線ミュオンは、1m から 20mの深度での主要生成寄与粒子であることを示している。

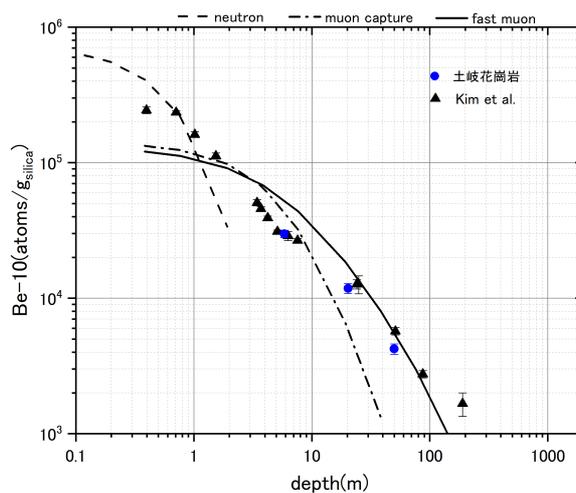


図 1 . 土岐花崗岩石英中の Be-10 濃度の深度分布

さらに、図 1 は、先行研究結果 (Kim et al. EPL 223, 2004) との比較を示している。50m での本研究結果は Kim et al. の結果より約 30%小さい値であった。Kim et al. の結果は、標準試料の値の補正から約 10%ほど小さくなる可能性がある。Kim et al. の試料は、土岐花崗岩試料と緯度が対称な南半球ニュージーランドの試料であり、現代の宇宙線強度としては両地点ともほぼ同様と考えられる。今後、土岐花崗岩の 100m 以上の深度での Be-10 濃度と比較することにより、異なる試料の問題か、あるいは過去の宇宙線スペクトル強度変化などが要因として関係しているかが明らかになる。

国際的に見てもこの深度の先行研究は2例程度しかなく、且つ単一ボーリングコア試料による系統的分析測定結果としては本研究が唯一のものである。本研究の結果は、現代の高エネルギー宇宙線ミュオン強度から推定される Be-10 濃度に比べ過去においては高エネルギー側で変化している可能性も示唆しており過去の高エネルギー宇宙線スペクトルを議論する上で重要な実験研究成果である。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

- “Observation of cosmogenic nuclide Be-7 concentrations in the air at Bangkok and trajectory analysis of global air-mass motion”, S. Suzuki, H. Sakurai, 他9名,
Proceedings of Science 35th International Cosmic Ray Conference ICRC2017, PoS(ICRC2017) 070 (1-8) (査読無)
- Izumino, Y. and Nakashima, K. (2015) Bismuth minerals from the W-Mo-Sn deposits hosted in the Iwafune granitoids Niigata Prefecture, Japan. Jour. Mineral. Petrol. Sciences, 110, 300-312. (査読有)
- Exploration of ^{10}Be analysis using $10\ \mu\text{g}$ of Be carrier”
Kazuho Horiuchi and Hiroyuki Matsuzaki
Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 361 (2015) 423-430(査読有)
- “High energy muon induced radioactive nuclides in nickel plate and its use for 2-D muon-beam image profile”, Y. Kurebayashi, H. Sakurai, K. Horiuchi, 他14名,
Nuclear Instruments and Method Physics Research A799, 54–58, 2015. (査読有)

〔学会発表〕(計 5 件)

- 鈴木颯一郎、櫻井敬久 他、「花崗岩中の宇宙線ミュオン生成核種の測定」第21回 AMS シンポジウム (JAMS-21)、2018
- 櫻井敬久 他、「地下20mまでの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」、日本物理学会第73回年次大会、2018
- Soichiro Suzuki, Hirohisa Sakurai 他、“Observation of cosmogenic nuclide Be-7 concentrations in the air at Bangkok and trajectory analysis of global air-mass motion”、35th International Cosmic Ray Conference、2017
- 櫻井敬久 他、「高エネルギーミュオンによる花崗岩中核種生成断面積」、日本物理学会第72回年次大会、2017
- 鈴木颯一郎、櫻井敬久 他、「タイ・バンコクにおける大気中宇宙線生成核種 Be-7 濃度の時間変動と地球規模での大気流跡線解析」、日本物理学会第72回年次大会、2017

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：堀内 一穂
ローマ字氏名：(HORIUCHI, kazuhō)
所属研究機関名：弘前大学
部局名：理工学研究科
職名：助教
研究者番号(8桁)：00344614

研究分担者氏名：中島 和夫
ローマ字氏名：(NAKASHIMA, kazuo)
所属研究機関名：山形大学
部局名：理学部
職名：教授
研究者番号(8桁)：70159060

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：岩田 尚能
ローマ字氏名：(IWATA, naoyoshi)

研究協力者氏名：鈴木 颯一郎
ローマ字氏名：(SUZUKI, soichiro)

協力者氏名：門叶 冬樹
ローマ字氏名：(TOKANAI, fuyuki)

研究協力者氏名：松崎 浩之
ローマ字氏名：(MATSUZAKI, hiroyuki)

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、研究者個人に帰属されます。