

# 岩盤表面における自然放射線量の計測

～高校生のフィールドワークでの活用事例～

新 村 太 郎

## 1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震では大規模な津波が発生し、東北地方沿岸をはじめ広い地域に甚大な被害をもたらした。福島県双葉郡大熊町および双葉町にまたがって設置された東京電力福島第一原子力発電所においては、津波による原子炉の冷却設備の電源喪失が原因で引き起こされた炉心溶融、建屋の水素爆発およびベントの実施等によって、大気中に大量の放射性物質が放出された。その結果事故を起こした原子力発電所の周辺のみならず、東日本の広範囲が放射能によって汚染された。発電所周辺の強汚染地域では住民の居住すら不可能になり、それ以外の汚染地域でも健康不安の問題、農作物や畜産物の信頼性およびそれに関連する保障問題、汚染された震災瓦礫の処理など、複雑で根の深い数多くの問題が持ち上がった。

それまで放射能および放射性物質とは、一般の市民生活から隔絶された限られた設備内における特殊なものであるという意識が一般的であったが、汚染地域のみならず、日本全国で放射能に関する関心が高まった。低線量の長期間に渡る被爆に対する健康被害のデータが乏しいこと等が理由で、国の放射能に対する規制値の信頼性に関しては不明な部分が多く、国民の間でも被爆に対する感覚は様々である。資源の乏しい日本において今後ともエネルギーの主体である電力を原子力発電に依存し続けるか否か、また今回の事故による放射能汚染とどう向き合うかに関しては、国民一人一人が深く考えてい

かなければならない課題である。そのためには国民が放射能に関して無知であるわけにはいかない。様々な方法によって放射能に関する理解を深めていく必要がある。

新村(2012)は、火山岩の岩盤表面で $\gamma$ 線を測定した場合、火山岩の特にカリウム含有量と $\gamma$ 線量に相関関係がみられることを予測し、実際にハンディタイプの線量計を用いて阿蘇火山の様々な火山岩の岩盤上で $\gamma$ 線量を計測して実証した。その中で線量を正確に測定するための条件および方法についても言及した。また、阿蘇地域に分布する火山岩に含まれるカリウム量は日本の火山岩の中でも特に多いことから、ここで使用されたハンディタイプの線量計を使用すれば計測に関して特別な技術を持った者でなくても、上記の条件下で測定方法に従うことによって化学組成と線量の間に関連関係があることを見いだすことは難しくないと、環境放射線を理解するためのフィールドワーク教材としての可能性を示唆した。本報告書ではこれに従って、高等学校の生徒のグループによって実施された岩盤上の $\gamma$ 線量計測に関する研究について、3つの事例を報告する。

## 2. 岩盤上で計測される $\gamma$ 線量とカリウム含有量に相関関係がある理由

新村(2012)は、岩盤上で計測される $\gamma$ 線量とカリウム含有量に相関関係がある理由について、玄武岩から流紋岩に至る様々な化学組成をもつ火山岩の標準試料における比放射能を見積もることによって、詳細に説明した。ここでは、

その概要を述べる。

地球上における環境放射線は人工放射線と自然放射線に分類され、前者は平常時の原子力関連施設等から出てくる放射線や、それらの事故や核実験等、人間がかかわる行為によって放出された放射性物質を線源とするものである。後者は、宇宙線や大気および固体地球中に存在する放射性物質から放出された放射線のことである。地球上で自然放射線量には大きな地域性がある。これは主としてその地域の地質を構成する土壌や岩石中の放射性物質含有量に依存する。天然の岩石中に含まれる放射性核種はウラン235、ウラン238、トリウム232、ルビジウム87およびカリウム40である。

比放射能  $S$  (Bq/g) と天然における存在度との積をとり、同位元素どうしの和を求めると、各元素の天然における比放射能が算出される。さらにこれらと天然の火山岩中の各元素の平均濃度との積をとることによって、天然の火山岩中における各元素の比放射能を見積もることができる。核種を構成する元素はすべて結晶分化作用の際に液相に濃集する傾向がある incompatible element であるため、全岩化学組成における  $\text{SiO}_2$  含有量が多い程、どの元素濃度も増加する傾向にある。

実際に標準試料 (JB-1, JB-1a, JB-2, JB-3, JA-1, JA-2, JA-3, JR-1, JR-2) の元素組成の平均値における核種毎の比放射能の割合を計算した結果、カリウム40の比放射能の割合は75.8%であった。カリウム含有量の割合がウラン、トリウムおよびルビジウムの合計の含有量の割合に比べ最も低くなる JA-2においても、カリウム40の比放射能の割合は68.3%であった。これらすべての元素は incompatible element であるため、カリウム含有量が増えれば火山岩中の他の incompatible element の組成も増加する上に、天然の火山岩中の比放射能はカリウム含有量に最も大きく影響を受けることから、結果的に外部に放出される放射線量も同様にカリウム含有量に依存することとなる。

### 3. 阿蘇火山の火山岩の $\gamma$ 線量と化学組成

中央火口丘群を形成する後カルデラ期の火山は、約9万年から現在にかけて活動した複製火山である。過去の噴出物は、噴火口が別に移ることから次の噴出物に完全に覆われる機会が減るため、阿蘇では多様な噴出時期をもつ火山岩が露出している。またそれらの化学組成は、 $\text{SiO}_2$  含有量が51%の玄武岩から72%の流紋岩まで多様でかつ大きなギャップがない (新村ほか, 2010)。

前述のように火山岩の比放射能において、カリウム40の比放射能は全体の約7割以上を占める。カリウム含有量が多い阿蘇の火山岩においては、相対的にカリウム濃度が低い他の地域の火山岩に比較して比放射能が大きい。岩石外部で測定される放射線量は相対的に強くなる。線量計による測定値は一般的に、測定する放射線量にある程度の強度がなければ再現性が悪くなる。よって阿蘇の火山岩は放射線の測定に都合が良い。さらに、阿蘇の火山岩は $\text{SiO}_2$  含有量と同様に $\text{K}_2\text{O}$  量に多様性があることから、多様な比放射能をもつことになる。結果的に岩石から放出される放射線量には多様性が生じ、それらの関連性について考える上で好都合な対象である。

以上のことから新村 (2012) は、阿蘇火山における火山岩の岩盤上で $\gamma$ 線量の計測を行い、図1に示すように放射性核種を含むカリウム、ルビジウム、トリウムおよびウランの含有量と計測された線量には正の相関関係があることを示した。

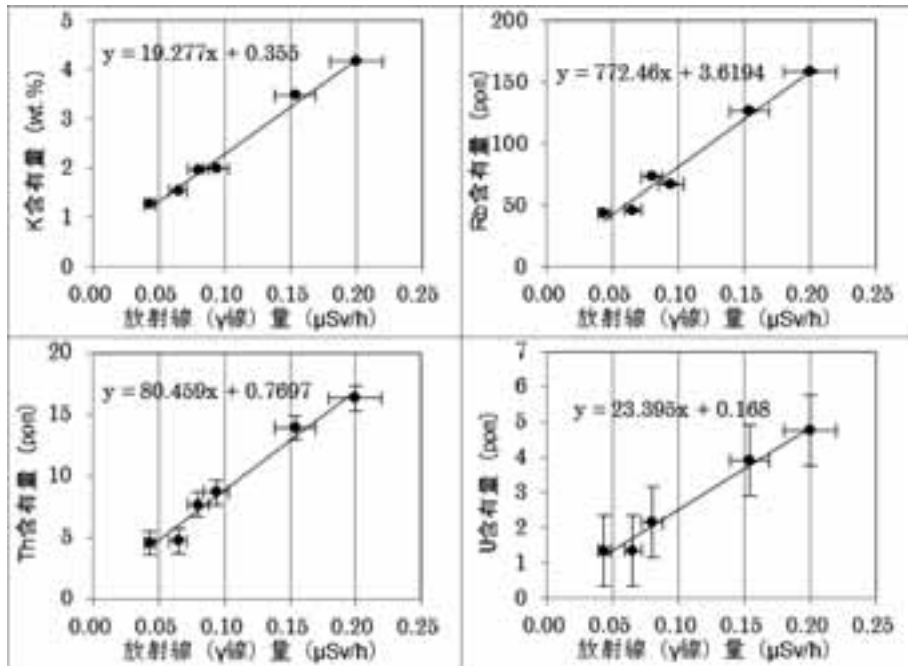


図1 γ線量とK、Rb、Th、U濃度のプロット (新村, 2012から引用)

線量の低い方から鮎返ノ滝溶岩, 赤瀬溶岩, 烏帽子岳火山, 夜峰火山, 立野溶岩, 高野尾羽根火山の値. 各プロットはほぼ直線上に並ぶ.

#### 4. γ線量の計測方法

新村 (2012) は岩盤表面上におけるγ線量の測定において様々な方法を試みた結果, ほぼ均質なデータを得られる方法を示した. 以下にその概要をまとめた.

場所による環境放射線の違いを把握するためには, 低線量でも再現性が良い測定装置を使用しなければならない. ここでは株式会社堀場製作所製の環境放射線モニタ Radi PA-1000を使用した. 放射線検出はシンチレーション式で, γ線のみ検出可能. 有効測定範囲は0.001~9.999μSv/hで, 極低~低線量のγ線の計測が可能である. サンプル時間は60秒であるため, 少なくとも測定対象位置に設置した後, 60秒以上経過した表示を読まなければならない. また相対指示誤差が±10%以内であるが, 計測する線量が大きい程, 見かけ上数値が変動する

ことが予想される. 電源は乾電池を使用でき, 本体はプラスチック製, 重量は175gであるため, フィールドでの携帯が容易である.

野外における測定条件は, 奥行きが十分である岩盤で, 露出面が100m<sup>2</sup>以上あることである. また「十分な奥行きと広がりがある平坦な岩盤の表面に計測器を置いて片面から来る放射線を計測する」ということを理想的な条件とした (図2-a). 表面に5ミリ以上の凹凸がある場合, 測定器と岩盤との密着が悪くなり, 理想的な測定値より小さくなる. また図2-bのように岩盤の面が平坦でなく, 岩盤の凹凸が計測器を囲むような状態になる場合, 片面のみの放射線以外を計測することになり, 理想的な測定値より大きくなる. 水の影響を考慮して, 岩盤表面が水で濡れていないことも条件に加えた. スコリアや軽石といった空隙の非常に多い岩盤は測定対象外とした.

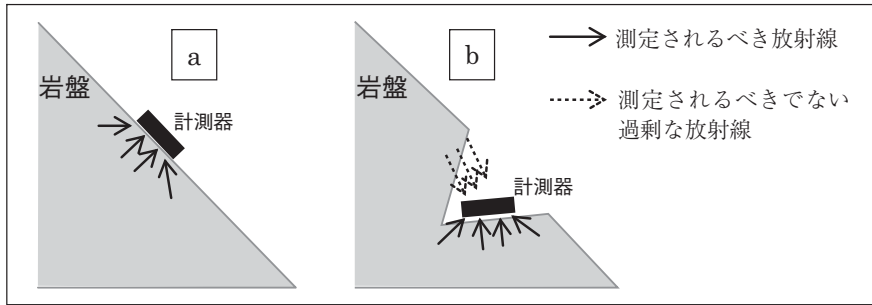


図2 岩盤の放射線量の計測方法（新村，2012より引用）

aのように平坦な岩盤の表面に計測器を密着させて、片側からの放射線量のみを測定する。  
bのように岩盤の凹凸によって計測器が囲まれる状態になると、計測器の上や横面方向からの放射線も測定することになり、aの状態より明らかに計測結果が高くなってしまふ。

## 5. フィールドワークの事例

「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」は、熊本県高等学校教育研究会地学部会が主催する熊本県内の高校生を対象としたフィールドワークを中心とした研究会である。毎年8月に阿蘇青少年交流の家において実施される1泊2日のフィールドワークや実験と、同じ年の10月に行われる成果発表会がその活動内容である。地学およびその関連分野の大学教員等を講師とした数グループのセミナーによって構成され、それぞれ数名の高校生が配属されて、それぞれのテーマについてのフィールドワークや実験を行う。本報告に関連するフィールドワークは、2012年、2013年および2015年に、これらセミナーグループの一つとして「阿蘇に分布する火山岩の多様性、および化学組成と岩盤表面での自然放射線量との関係」のテーマのもとに実施されたものである。

### 5-1. 2012年度の事例

2011年3月の東北地方太平洋沖地震にともなう原子力発電所事故から約1年半の時期で、放射能汚染や避難住民に関する報道も連日のようであったため、高校生にとっても放射能という言葉は関心の高いものであった。フィールドワークのための事前研修においては、はじめに

放射線に関する基礎的な事項と環境放射線について、その後、岩盤の $\gamma$ 線量を測定する意義と測定方法について説明した。さらに、市販されているラジウムなどの放射線源が含まれるセラミックボール（ラジウム温泉の元として販売されている）、湯の華（温泉の沈殿物）、ガスランプ用マンテル（トリウムが少量含まれるもの）など比較的高い線量を出すものについて、実際に線量を測定し、距離との関係や遮蔽についての簡単な室内実験を行った。また、上記の線源、ホームセンターで販売されているガラス皿等とドライアイスを使用して $\alpha$ 線の飛跡を観察する霧箱の実験を行ったが、線源から出る $\alpha$ 線量が十分でなかったため、はっきりと観察することはできなかった。これら放射線に関する学習の他、測定対象となる阿蘇火山の成り立ちについて説明を行った。

フィールドワークは一日半の時間が与えられ、放射線の測定のみならず、カルデラ地形や火山地形、露頭における火山岩の火山学および岩石学的な所見についても解説を行った。測定においては前述した通り、比較的新鮮な岩石が露出する岩盤表面で、平坦なところを選び、最低3分間固定して測定値が安定してから数値を記録し、数メートル離れた岩盤上で同様に測定し、計3回の測定を行った。以上の手順で、高野尾羽根火山、赤瀬溶岩、中岳、草千里、烏帽子岳、

夜峰火山の計6種類の火山噴出物についての測定を行った。結果を表1および図3に示した。新村(2012)による測定箇所と3箇所が共通であり、そのうち2箇所はおおよそ誤差の範囲内で一致しているが、高野尾羽根火山のデータがこ

こでは低い。これは測定時の安全性を確保するために、岩盤の露出範囲が小さい露頭で測定したことに起因すると思われる。以上のことから、測定条件がそろえば高校生が測定してもほぼ再現が可能であることが分かった。

表1 2012年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」における阿蘇の火山岩の岩盤表面における放射線(γ線)量の測定結果とカリウム含有量

	岩盤表面のγ線量 (μSv/h)				カリウム含有量 (wt. %)
	測定1	測定2	測定3	平均	
高野尾羽根火山	0.134	0.159	0.147	0.147	4.16
赤瀬溶岩	0.065	0.061	0.075	0.067	1.54
中岳	0.049	0.046	0.045	0.047	1.66
草千里	0.102	0.102	0.106	0.103	2.91
烏帽子岳	0.105	0.095	0.110	0.103	1.97
夜峰火山	0.081	0.074	0.077	0.077	1.98

γ線量は2012年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」に参加した高校生チームが測定した結果を引用。カリウム含有量は新村ほか(2010)のデータを引用。

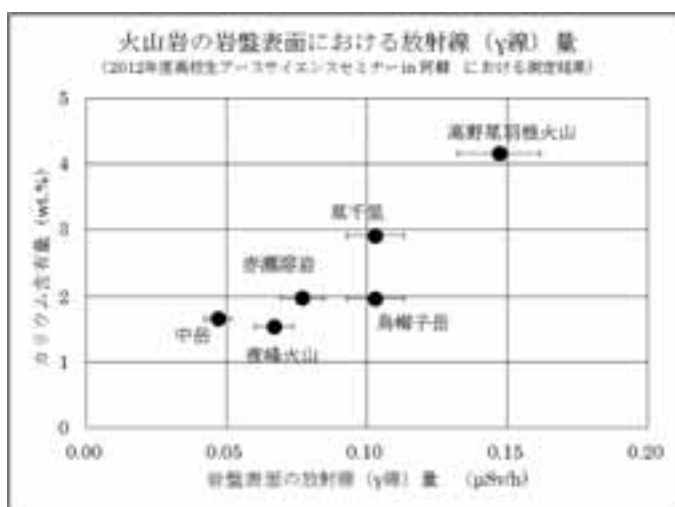


図3 2012年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」における阿蘇の火山岩の岩盤表面における放射線(γ線)量の測定結果とカリウム含有量

(表1のデータをプロット)

γ線量は2012年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」に参加した高校生チームが測定した結果を引用。カリウム含有量は新村ほか(2010)のデータを引用。

5-2. 2013年度の事例

フィールドワークの事前研修や室内実験において、前年度は霧箱の実験が難しいことが判明したため、そのかわりに放射線の遮蔽について扱い、その他はほぼ同様な内容で行った。遮蔽実験では、身近にあるものを遮蔽物として使用した。結果を図4に示した。フィールドにおいては、立野溶岩の他は外輪山を構成する先阿蘇火山岩類を測定対象とした。室内実験およびフィールドワークでの測定では、測定開始後最低3分間データが安定するのを待ち、安定したことを確認して数値を読み取った。

遮蔽実験では線源として、2012年度での室内実験でも使用したラジウムが含まれるセラミックボールを使用した。線源と線量計の間を10cm離して線量を測定し、その後それぞれ次のものを入れて3分以上経過した後に再度計測した。幅の異なる水槽に入れた水（それぞれ6.0cm, 7.8cm）、手のひら、厚さ約2cmの鉄

板、フィールドで拾った平たい石（安山岩で約7cm）、軽石（阿蘇-4火砕流堆積物の軽石で約10cmの厚さ）。遮蔽率は

$$\frac{(\text{遮蔽前の線量}) - (\text{遮蔽後の線量})}{(\text{遮蔽前の線量})}$$

とした。定量的な評価には至らなかったものの、密度の高い物質、厚みがある物質ほど遮蔽率が高いことが分かった。また、水は密度の割に遮蔽率が高いことが分かり、原子炉内での水が冷却のみならず、放射線の遮蔽に重要であることについても理解がなされた。

2012年度のフィールドワークおよび新村(2012)ではカリウム量が多い阿蘇後カルデラ期の火山岩を扱ったのに対して、ここではそれに比較してカリウム量が低い先阿蘇火山岩類および、岩石に比べて空隙率の大きい阿蘇-4火砕流堆積物について測定を行った。

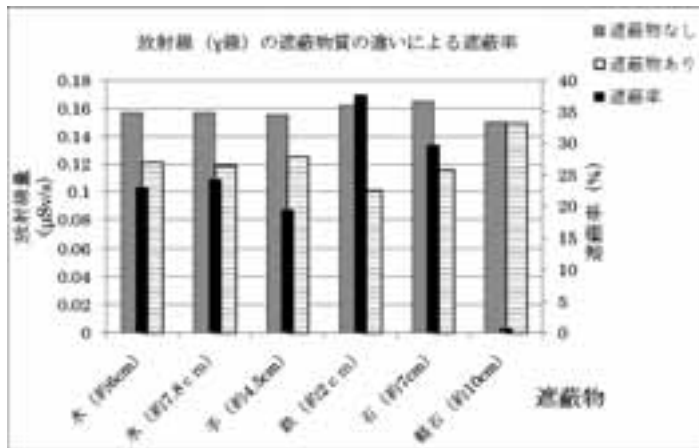


図4 2013年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」における放射線 (γ線) の遮蔽率の実験結果

データは2013年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」に参加した高校生チームが測定した結果を引用。

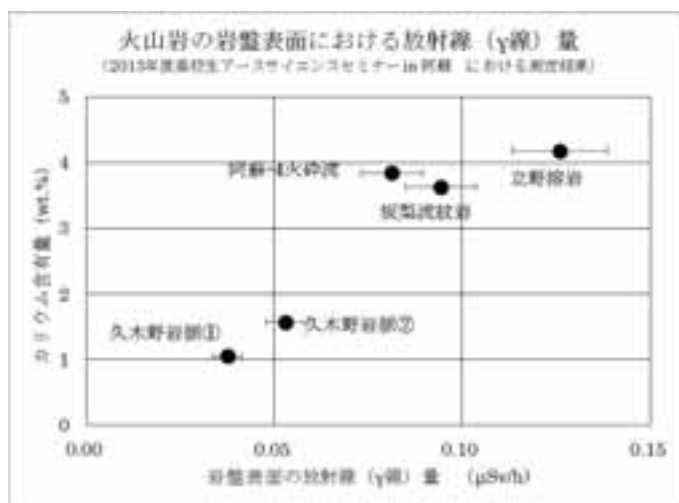


図5 2013年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」における阿蘇の火山岩の岩盤表面における放射線（ $\gamma$ 線）量の測定結果とカリウム含有量

$\gamma$ 線量は2013年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」に参加した高校生チームが測定した結果を引用。カリウム含有量は新村ほか（2010）のデータを引用。

結果を図5のようにグラフにプロットした。ここでは新村（2012）の立野溶岩が $0.15 \mu\text{Sv/h}$ 近いのに対して、約 $0.10 \mu\text{Sv/h}$ であり、誤差の範囲を超えて低くなっている。立野溶岩は立野地域の白川右岸に100m以上にわたって広く露出している。新村（2012）の測定箇所とは離れた場所で測定しているため、立野溶岩内部での不均一性の可能性も考えられる。

新村（2012）による $0.15 \mu\text{Sv/h}$ という数値を図5にあてはめると、全体の傾向から大きくはずれてしまう。すなわち、ここで測定された立野溶岩はカリウム含有量自体も新村（2012）による試料とは異なっている（相対的に低い）とすれば矛盾がない。阿蘇-4火砕流堆積物のプロットは左側にずれている。これはこの堆積物が空隙が多いためにカリウム含有量に比べて低い計測結果になったためと考えられる。カリウム量が相対的に低い先阿蘇火山岩類である久木野岩脈①および②は、全体の傾向と調和的である。以上のことから、立野溶岩に見られるように、本来蛍光X線測定装置等を使用して大がかりな分析を行わなければ分からない岩石の化学

組成に関する不均質性が、岩盤に線量計を3分間置くだけの手軽な方法によって予測された。また新村（2012）および2012年度の「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」ではカリウム量の多い後カルデラ期の阿蘇の火山岩を測定対象としたが、カリウム量が比較的少ない先阿蘇火山岩類においても測定結果から同様の傾向を見いだすことが可能であることも分かった。

### 5-3. 2015年度の事例

2012年度および2013年度と同様に、はじめに放射線に関する基礎的な事項と環境放射線について、その後、岩盤の $\gamma$ 線量を測定する意義と測定方法について説明した。また2012年度および2013年度の「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」における成果（いくつかの室内実験およびフィールドワークの結果）と、そこから考えられることについて簡単に討論した。フィールドワークにおいては、これまでに測定が行われた場所に加え、外輪山を構成する先阿蘇火山岩類の一つである長尾野玄武岩（実際には玄武岩質安山岩）、また主化学組成のデータ

が公表されていない高森町のらくだ山岩脈（ジオサイトのひとつ）等についても測定を行った。今回は、計測、タイムキーパー、位置の記録（GPSによる緯度経度）、写真等の役割分担を交代しながら一人一人に経験させると同時に、データの共有をこまめに行って後でデータが怪しくなり、再測定するなどの手間が生じないように、管理を徹底した。測定結果をグラフにプロットしたものを図6に示した。今回は玄武岩質安山岩と流紋岩であったために中間の安山岩組成のものがないが、2012年度および2013年度

の結果とほぼ同様の傾向である。ここでは、これまでの成果を活用して、主化学組成が未公表の岩盤の線量を測定した。岩盤上の $\gamma$ 線量からカリウム含有量を逆に推定することを試みた。新村（2012）および、2012年度、2013年度、2015年度の「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」で得られたデータをまとめてプロットしたものが、図7である。全体的に線量が高いところほどばらつきが大きくなっている。同じ岩体もしくは溶岩に分類されているところで位置を変えて測定した場合に、このような差が生じ



写真 1-A（上）および 1-B（右上）、1-C（右）

2015年度の「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」におけるフィールドワークの様子。1-Aはらくだ山岩脈の母岩の産状について観察および議論しているところ。ここまで到達するために100m以上の距離の後ろにあるような背丈以上ある草をこいできた。1-Bはらくだ山南岩脈の斜面上で放射線量を計測しているところ。単に計測するのみならず、危険のない範囲内で理想的な岩盤にアクセスしたり、岩石の産状からその生い立ちについて考える機会をもった。計測は写真1-Cの堀場製作所製の環境放射線モニタRadi PA-1000を使用した。これを岩盤表面に密着するように手で3分以上押さえることを3回続ける。



ることが多い。カリウム含有量が多い高野尾羽根火山、立野溶岩、坂梨流紋岩は露出する面積が比較的広いことから、異なった場所で測定することになり、内部の不均一性がばらつく一因

とも考えられるが、それを確かめるにはそれぞれの場所で試料を採取して主化学組成を分析しなければならない。一方、もともと線量が高い岩盤では、3回測定した際にもばらつきがみら

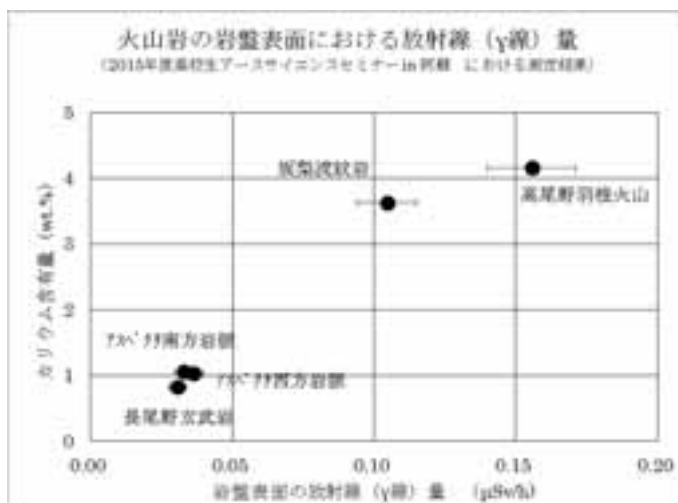


図6 2015年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」における阿蘇の火山岩の岩盤表面における放射線（γ線）量の測定結果とカリウム含有量

γ線量は2015年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」に参加した高校生チームが測定した結果を引用。カリウム含有量は新村ほか（2010）のデータを引用。

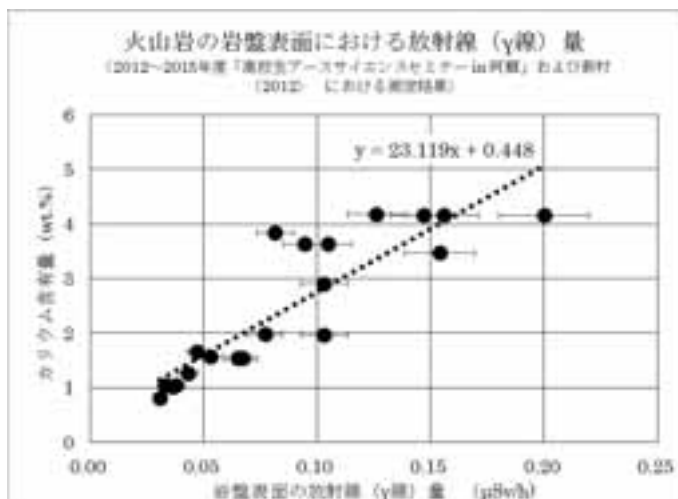


図7 2012～2015年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」および新村（2012）における阿蘇の火山岩の岩盤表面における放射線（γ線）量の測定結果とカリウム含有量をまとめてプロットした

γ線量は2015～2015年度「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」に参加した高校生チームが測定した結果および新村（2012）を引用。カリウム含有量は新村ほか（2010）のデータを引用。

れることから、そのばらつきを反映している可能性もある。そのため線量が高い場合は測定回数を増やして平均をとるなどの工夫をする必要がある。また、線量の高さに応じて、最低何回測定すれば全体として安定した値になるかは、実際に測定を行って統計的に分析しなければならないであろう。しかし、前者のように岩石試料を採取して主化学組成を分析することに比較すれば手間および経費は少なくて済むであろう。

今回測定したうち、高森町のらくだ山岩脈（阿蘇ジオパークのジオサイトとして指定されている）およびその南方の岩脈では、ともに  $0.028 \mu\text{Sv/h}$  であった。これらの値を図7の線形近似式にあてはめると、カリウム含有量 ( $\text{K}_2\text{O}$  wt.%) は  $1.10$  wt.% と推定される。このような値をもつ火山岩の  $\text{SiO}_2$  wt.% から推定すると、玄武岩質安山岩から安山岩の組成である。斑晶鉱物として輝石が多く含まれるという現場での観察結果と調和的である。

2015年度の「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」に参加して高校チームでは、さらに高校の近くの花崗岩分布地域の露頭において様々な条件で放射線量を測定、さらに放射線の特徴を理解するためにより緻密な室内実験を独自に行うなど、より発展的な課題を自ら設定してその結果を出した。

## まとめ

新村 (2012) による火山岩の岩盤表面の  $\gamma$  線量を測定することによって化学組成と  $\gamma$  線量との関係が容易に把握できることを、放射線についての理解を深めるきっかけ作りとして活用するため、高等学校の理科教育におけるフィールドワーク「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」において3回にわたってテーマとしてとりあげた。線量計は持ち運びが容易で、岩盤にアクセスすれば計測も難しくない。計測のみならず火山岩についての知識を現場を通じて深めることによって、阿蘇火山の生い立ちを知る機

会ともなった。計測結果はいくつかの小さな問題点を残しながらも、おおむね良好であり、短い期間に高校生が取り組む課題としては適切であると思われる。また、回が進むにつれてデータが蓄積されることによって、後に取り組むグループは、より詳しく具体的な内容を理解することになった。しかしながら、高い線量を示すところではデータがばらつく原因など、未解決の課題も残された。今後、この課題を解決する方法を探り、より正確な、岩盤表面の  $\gamma$  線量とカリウム含有量の関係を導くことを今後の「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」の課題の一つとしたい。放射線についての関心と理解を深めつつ、線量計をかざしただけでその岩石の主化学組成を推測できる画期的な手法を代々の高校生のフィールドワークによって確立することは、フィールドワークが学習の枠を超えて開発という分野まで発展させることとなる。

## 謝辞

本研究は、平成25および26年度熊本学園大学産業経営研究所調査研究費を使用した。本報告書は、2012年度、2013年度および2015年度の「高校生アースサイエンスセミナー in 阿蘇」における熊本県内の高等学校の先生方および生徒のみなさんの熱心な取り組みの一部を紹介させていただいたものである。深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- 新村太郎・荒川洋二・三好雅也・柴田知之(2010)：阿蘇火山における先カルデラから後カルデラ期火山岩の同位体比および全岩化学組成の時間変化（招待講演）、日本地球化学会第57年会、立正大学熊谷キャンパス。
- 新村太郎(2012)：阿蘇火山岩の岩盤表面における放射線 ( $\gamma$  線) 量と化学組成の関係、熊本学園大学論集『総合科学』第18巻第2号（通巻第36号）、pp. 59-75。