

# 空間線量計を用いた岩石の放射線量の簡易測定法と骨材の放射線評価

EASY MEASUREMENT METHOD OF THE RADIATION DOSE RATE OF ROCK USING RADIATION DOSIMETER AND RADIATION EVALUATION OF AGGREGATE WITH IT

今井忠男\*・網田和宏\*\*・木崎彰久\*\*\*・石倉広大\*\*\*\*・杉本文男\*\*\*\*  
by Tadao IMAI, Kazuhiro AMITA, Akihisa KIZAKI, Koudai ISHIKURA and Fumio SUGIMOTO

## 1. はじめに

2011年の東日本大震災では、地震・津波災害だけでなく、津波によって福島第一原発の事故が発生し、福島県内に多大な放射能汚染を招いた。さらには、骨材の放射能汚染が原因となり、震災後の新築マンションから高濃度な放射線量が検出され、2012年には骨材の放射線基準値が策定された。著者らは、これらの経緯を詳細に調査・分析し、報告書としてまとめた<sup>1)</sup>。

骨材の基準値は、セシウムの含有量として100 Bq/kg以下と決められたが<sup>2)</sup>、同時に、簡易基準として線量値 $0.23 \mu\text{Sv/h}$ 以下も定められた。放射能汚染の有無として、原発由来であるセシウムの含有量を指針とすることは正確であるが、岩石試料の空間線量率は、測定法および周囲の自然放射線環境<sup>3)</sup>によって、大きく異なる可能性があるため、間違った評価が行われる危険性がある。したがって、通常の空間線量計を用いる場合、測定方法および自然放射線量について、十分に検討する必要がある。

本研究では、空間線量計を用いた岩石試料の真の線量率について、簡易的な測定法を提案した。さらに、この手法を用いて骨材に利用される岩石および典型的な鉱物の自然放射線量を測定した。また、

福島県に近い地域の採石場における岩石および表土の自然放射線量、および汚染放射線量について調査し、これらの地域における汚染の現況を明らかにした。

## 2. 測定理論

### 2.1 空間線量と表面線量

放射能の汚染を計測する場合、図1に示すような(a)表面線量計と(b)空間線量計の2つがある。表面線量計は、地表面等に付着した放射能から放射される $\beta$ 線を測定する機器である。 $\beta$ 線は射程が短いいため、計測対象物以外からの放射線の影響は受けず、表面の汚染量だけが測定できる。これに対し、空間線量計は、射程の長いガンマー線を測定する機器であり、大気中の汚染量等の空間の汚染を測定するために適しているが、地表面等の特定箇所の汚染量だけを抽出することは出来ない。

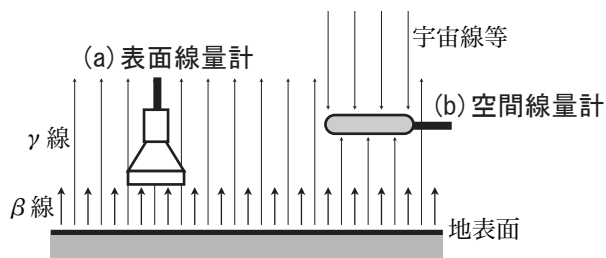
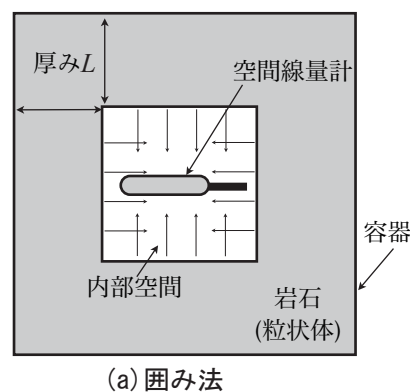
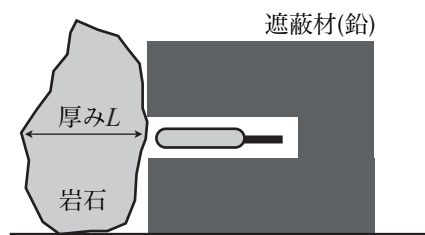


図1 放射線量計の測定原理

\* 秋田大学 教授 国際資源学部 (〒010-0852 秋田市手形学園町1-1)、\*\* 秋田大学 助教 理工学部、\*\*\* 秋田大学 准教授 国際資源学部、\*\*\*\* 元秋田大学 学生 工学資源学部、\*\*\*\*\* 秋田大学 名誉教授



(a) 囲み法



(b) 遮蔽法

図2 空間線量計による岩石の $\gamma$ 線量率の測定法

したがって、一般的に用いられることの多い空間線量計を使用して、特定の岩石(骨材)の放射線量だけを評価することは難しい。

## 2. 2 空間線量計による岩石の放射線量測定理論

一般的な空間線量計を用いて、岩石から放射される放射線量のみを測定するには、図2(a)に示すように、他の放射線の影響を排除するために、測定器を岩石試料で囲う必要がある。これを囲み法と呼ぶこととする。このように測定器を囲う試料には、碎石のような粒状物を容器に詰めたものでも、連続体と同等とみなせる。ただし、囲み法では、岩石試料の厚み $L$ が十分に厚くなければならない。

通常、岩石試料は測定器を囲うほど、十分な量を確保できないため、試料の質量が多くない場合は、図2(b)に示すように、岩石試料の放射線量を測定する測定器の1面以外を十分な厚さの鉛で遮蔽して、他面の影響を排除する方法が考えられる。この方法を遮蔽法と呼ぶこととする。 $^{137}\text{Cs}$ の $\gamma$ 線なら、厚さ40mmの鉛ブロックで1/100まで遮蔽できる<sup>4)</sup>。この遮蔽法では、測定器の全測定面のうち、1面だけで放射線量を感知するため、囲み法に比べ、測定される放射線量が少なく計測される。そのため、真の放射線量は、1測定面での実測値に、この測定面の測定率 $a$ (1測定面での測定値/全測定面での測定値)の逆数(補正倍率 $1/a$ )を乗じた値となる。

## 3. 実験方法

### 3. 1 遮蔽法による放射線量測定装置

本研究では、写真1に示す、シンチレーション管式の空間線量測定器(テクノエーピー社製、TC100s)を用いて、遮蔽法による放射線量測定装置を考案した。この空間線量測定器は、 $\gamma$ 線による空間線量を測定できるだけでなく、放射線エネルギーのスペクトル分析によって、放射性核種の特特定が可能である。またこの測定器は、正面と上・下面の3面が主要な

測定面であることを確認しており、各主要面の測定率を求める必要がある。

次に、本実験装置に用いた鉛ブロックによる遮蔽箱を写真2に示す。厚さ50mmの鉛ブロックを用いて上下面を遮蔽(遮蔽率約1/300)し、側面は厚さ8mmの鉛板で覆った。これら鉛で囲まれた空間(幅84×高さ35×奥行き100mm)内に放射線測定器を挿入し、測定器の正面に岩石試料を置いて測定をおこない、この値を正面のみの実測値 $R_{sf}$ とした。

なお、鉛にも微量の放射性同位体が含まれているため、鉛で遮蔽しても鉛の放射線量の影響によって、放射線量が0にはならない。そのため、この鉛ブロックで測定器の全面を囲い、この鉛の放射線率 $R_{pb}$ を測定し、これに $(1-a)$ をかけた値を補正值として用いた。

以上のことから、遮蔽法による岩石の放射線量率 $R_s$ は次の式で求められる。

$$R_s = 1/a \{R_{sf} - (1-a)R_{pb}\} \cdots (1)$$

### 3. 2 測定精度の検証法

#### (1) 測定平均値

物体から自然に放出される放射線は、瞬間的に変化するため、放射線量を評価するには、時間平均値が用いられている。とくに、微量な放射線環境では、強度のバラツキが多くなるため、十分な時間平均が必要となる。

本実験では、放射能汚染されていない本学実験室内において、微量な空間線量率を500時間(20日程度)、連続的に測定し、値の変動が十分に小さくなる平均時間を求めた。

#### (2) 岩石試料の厚み

囲み法および遮蔽法においては、周囲環境の影響を除くため、測定試料を十分に厚くする必要がある。この試料の厚みの最低値を決定するため、囲み法を用いて、花崗岩の厚さと放射線量との関



写真1 空間線量測定器

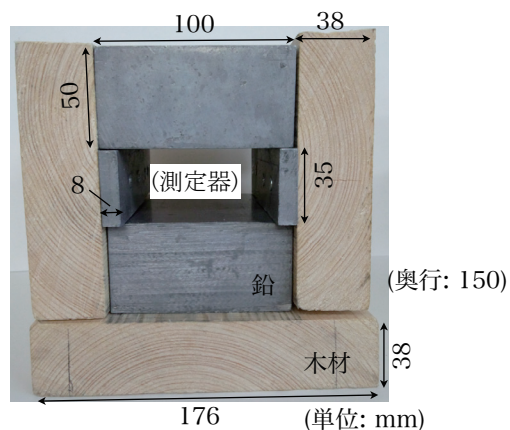


写真2 遮蔽箱

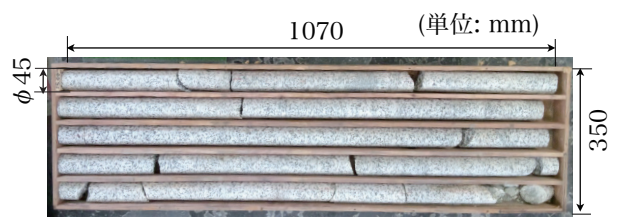


写真3 花崗岩のボーリングコア箱 (厚み: 60)



写真4(a) コア箱による囲み法

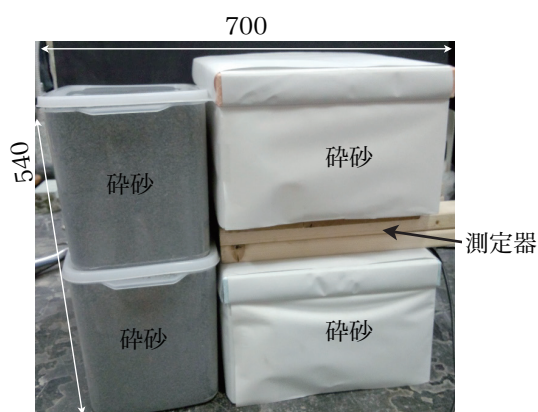


写真4(b) 砕砂による囲み法 (単位: mm)

係を測定した。実験試料には、写真3に示す花崗岩コアが詰められたコア箱を用いた。花崗岩コアの直径は45mm、長さ約1,000mmで、1つのコア箱には5本の花崗岩コアが詰められている。このコア箱を用い、測定器の3面(正面、上面、下面)を囲んで花崗岩の放射線量を測定した。

### (3) 囲み法と遮蔽法との比較

#### A) 花崗岩コア箱を用いた囲み法

前述の花崗岩コア箱を用い、写真4(a)のようにコア箱を積み重ねて、測定器の主要な3面を囲った。囲いの寸法は、幅700mm、高さ540mmとした。

#### B) 安山岩砕砂を用いた囲み法

粒度が5mm以下の安山岩砕砂を用い、これを容器内に入れて、写真4(b)のように、コア箱と同程度の囲いの大きさとなるように、測定器を囲った。

これら2種類の囲み法と同様の測定試料を、遮蔽

表1 岩石・鉱物の測定試料数

|     | 岩石 | 一般鉱物 | 放射性鉱物 |
|-----|----|------|-------|
| 試料数 | 15 | 12   | 6     |
| 分類数 | 4  | 7    | 3     |

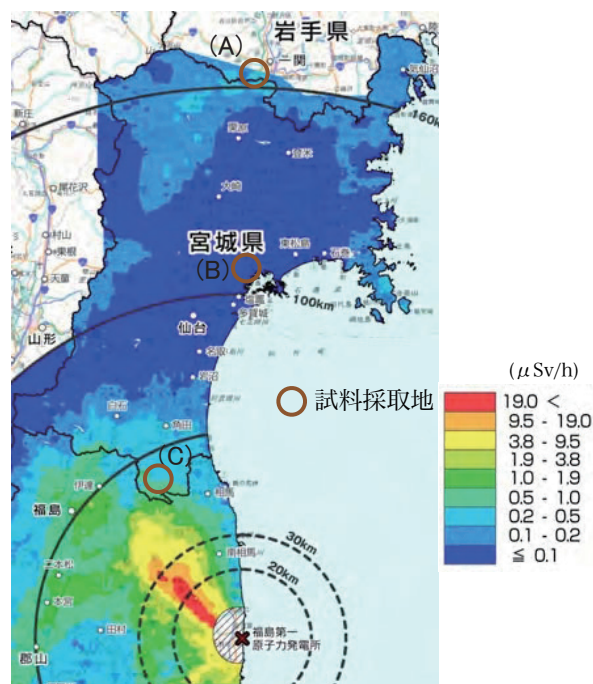


図3 試料の採取場所と空間線量率の分布<sup>5)</sup>

表2 採石場における測定試料 (2012年)

| 採取地域 | 採取場所 | 試料名       |
|------|------|-----------|
| 一関市  | A採石場 | 砕砂 (硬質砂岩) |
|      |      | 沈殿堆積物     |
|      |      | 表土        |
| 大郷町  | B採石場 | 天然砂       |
| 丸森町  | C採石場 | まさ土       |

法でも測定し、両者の測定値を比較することで、遮蔽法の補正倍率(1/a)および測定精度を求めた。

### 3.3 鉱物・岩石の自然放射線量の測定試料

遮蔽法によって、自然の鉱物・岩石の放射線量を求め、採石場の岩盤の自然放射線量を評価するため、表1に示すように岩石、一般鉱物および放射線鉱物について測定した。測定試料は、厚みが10cm以上となるものを選んで測定した。

なお、放射線鉱物については、本学付属鉱業博物館の協力を得て、管理された所定の場所で測定をおこなった。



### 3.4 汚染地域における骨材の放射線量の測定

つぎに、福島原子力発電所の事故によって汚染された、東北地域における採石場の試料を、遮蔽法によって測定した。試料の採取にあたっては、図3に示す、2012年8月現在の空間線量率の分布図を参考にした<sup>5)</sup>。図より、福島第一原発を中心に汚染は北西部に広がっている。広域的には、汚染濃度は、福島第一原発から同心円上に遠ざかるにしたがい低下する傾向にあるが、宮城県と岩手県の県境付近は、ホットスポット的に濃度が高くなっていることがわかる。

この現状から、図3に示すような線量率の分布にしたがい、線量率が最も高い宮城県南部(C採石場)、最も低い宮城県中部(B採石場)そしてホットスポットの岩手県南部(A採石場)から測定試料を、2012年に採取し、測定した。それぞれの採石場から採取した試料を、表2にまとめて示す。なお、採取試料は骨材製品だけでなく、表土および石粉沈殿等も採取した。

## 4. 実験結果

### 4.1 遮蔽法の測定精度

#### (1) 時間平均値

図4に、本実験室における空間線量率の時間変化を示す。図中の実線は、1分、30分、60分平均値を示している。なお破線は、8時間の平均値0.057  $\mu\text{Sv/h}$ を示している。図より、1分平均値の時間変

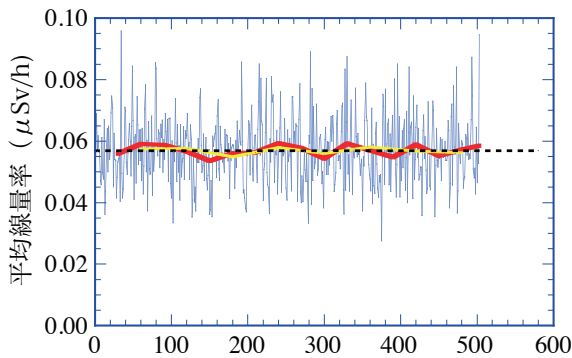


図4 空間線量の平均値

化は大きい(標準偏差0.011)、30分平均値の変動幅は十分小さく(標準偏差0.0018)、およそ8時間平均値と同程度であることがわかる。したがって、空間放射線量の測定では、30分程度平均することが望ましく、本研究の測定も30分平均値とした。

#### (2) 試料の厚み

図5に岩石コア箱を重ねた厚みと平均線量率との関係を示す。花崗岩の放射線量は、試料の厚みが大きくなるにしたがい増加し、13cm以上で一定となる傾向にあり、この値が真値と考えられる。また、10cm程度で真値の95%程度になることから、試料の厚みは、10cm以上が必要と思われる。

#### (3) 遮蔽法と囲い法の比較による検討

最初に、遮蔽箱の鉛の放射線量率  $R_{pb}$  を測定し、0.0134  $\mu\text{Sv/h}$ を得た。遮蔽箱では測定の主要3面のうち、上下の2面が鉛の影響を受けると考えることから、遮蔽箱から影響をうける線量は、この鉛の放射線量率の(1-a)の割合と考えられる。

表3(a)に、囲み法と遮蔽法で測定した岩石試料の放射線量率  $R_k$  を示す。これら測定値から、式(1)を用いて、本測定器の測定面(正面)の測定率  $a$  を求めた。花崗岩および安山岩で、それぞれ0.294および0.311であり、平均が0.303であった。この値は、測定面の主要3面の1つとして、1/3(0.333)に近い値であることから、妥当であると思われる。ま

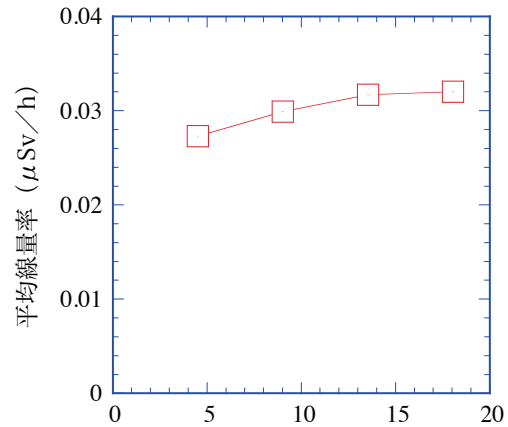


図5 試料の厚さと線量率

表3(a) 各方法による放射線量率の実測値

| 試料         | 実測線量率( $\mu\text{Sv/h}$ ) |              | 測定率 $a$ |
|------------|---------------------------|--------------|---------|
|            | 囲み法 $R_k$                 | 遮蔽法 $R_{sf}$ |         |
| コア箱(花崗岩)   | 0.0767                    | 0.0320       | 0.249   |
| 砕砂(安山岩)    | 0.0578                    | 0.0272       | 0.310   |
| (平均 0.303) |                           |              |         |

表3(b) 遮蔽法の測定精度

| 試料       | 遮蔽法線量率 $R_s$ ( $\mu\text{Sv/h}$ ) | 相対誤差 (%) |
|----------|-----------------------------------|----------|
| コア箱(花崗岩) | 0.0748                            | +2.5     |
| 砕砂(安山岩)  | 0.0589                            | -2.0     |

た、表3(b)に、 $a=0.303$ を用いた遮蔽法線量率 $R_s$ と、信頼性のある囲い込み法による線量率 $R_k$ との相対誤差を求め、両者がほぼ一致することを示した。表より、本測定法の精度は、囲い法と比較し $\pm 2.5\%$ 程度であることがわかった。

以上のことから、本遮蔽法では、測定値 $R_{sf}$ 、鉛補正值 $R_{pb}$ 、測定率 $a$ を式(1)に代入することで、岩

石試料等の放射線量率 $R_s$ が、十分な精度で求められることがわかった。

#### 4.2 鉱物・岩石の自然放射線量

表4(a)に、本遮蔽法によって測定された、一般鉱物の放射線量率を示す。表より、鉱物分類による放射線量率の特徴は見られず、試料ごとにバラバラな値を示しており、平均値は $0.0597 \mu\text{Sv/h}$ と十

表4(a) 一般鉱物の放射線量率

| 分類          | 鉱物名    | 化学組成                                                                      | 産地       | 放射線量率<br>( $\mu\text{Sv/h}$ ) |
|-------------|--------|---------------------------------------------------------------------------|----------|-------------------------------|
| 元素鉱物        | 自然砒素   | As                                                                        | 赤谷       | 0.0647                        |
| 珪酸塩鉱物       | 白雲母    | $\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$                     | ゴベルナードール | 0.0977                        |
|             | 正長石    | $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$                                                | 石川町      | 0.0926                        |
| リン酸塩鉱物      | 燐灰石    | $\text{Ca}_5(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$ | 足尾       | 0.0461                        |
|             | 方解石    | $\text{CaCO}_3$                                                           | 山口       | 0.0291                        |
| 炭酸塩鉱物       | 菱苦土石   | $\text{MgCO}_3$                                                           | 満州       | 0.0788                        |
|             | 菱マンガン鉱 | $\text{MnCO}_3$                                                           | 稲倉石      | 0.0720                        |
| 硫酸塩鉱物       | 石膏     | $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$                                 | 大館       | 0.0323                        |
| 硫化鉱物        | 黄銅鉱    | $\text{CuFeS}_2$                                                          | 協和       | 0.0199                        |
|             | 黄鉄鉱    | $\text{FeS}_2$                                                            | 花輪       | 0.136                         |
|             | 方鉛鉱    | $\text{PbS}$                                                              | 不明       | 0.0138                        |
| 酸化鉱物        | 磁鉄鉱    | $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$                                | 佐久町      | 0.0327                        |
| (平均 0.0597) |        |                                                                           |          |                               |

表4(b) 放射性鉱物の放射線量率

| 分類        | 鉱物名     | 化学組成                                                                                                | 産地  | 放射線量率<br>( $\mu\text{Sv/h}$ ) |
|-----------|---------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------------------------------|
| 珪酸塩鉱物     | 褐レン石    | $(\text{Ca}, \text{R})_2(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Ti})_3\text{Si}_3\text{O}_{12}(\text{OH})$     | 生駒郡 | 20.0                          |
| リン酸塩鉱物    | 人形石     | $(\text{U}^{4+}, \text{Ca}, \text{Ce})_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 1 \sim 2\text{H}_2\text{O}$           | 人形峠 | 0.0887                        |
|           | 阿武隈石    | $(\text{Y}, \text{Ca})_5(\text{SiO}_4, \text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F})$                         | 飯坂  | 25.5                          |
|           | モナズ石    | $(\text{Ce}, \text{La}, \text{Nd}, \text{Th}) \text{PO}_4$                                          | 川崎  | 0.570                         |
| 酸化鉱物      | サマルスキー石 | $(\text{Y}, \text{Ce}, \text{U}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Nb}, \text{Ta}, \text{Ti})_5\text{O}_{16}$ | 不明  | 3.41                          |
|           | コロンブ石   | $(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$                                          | 石川町 | 1.80                          |
| (平均 8.55) |         |                                                                                                     |     |                               |

分に低い値であった。なお、黄鉄鉱のみ $0.136 \mu\text{Sv/h}$ と多少高い値を示したが、鉱物の特徴であるかどうか不明である。また、表4(b)の放射性鉱物の結果では、極めて高い値を示すグループと、あまり高くないグループに分かれることから、放射性鉱物を含有していても、大きな影響がない場合もあることがわかった。次に、表4(c)に岩石の結果を示す。線量率の平均値は $0.00639 \mu\text{Sv/h}$ と、一般

鉱物の平均値と同程度であることがわかった。その中で、花崗岩類の放射線量率が、約 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ と高いことがわかる。つまり、花崗岩類には、微量の天然の放射性鉱物が含まれていることが推察される。

次に、一般鉱物と岩石の放射線量率についてのヒストグラムを図6(a)に示す。岩石とは、大部分が珪酸塩および炭酸塩鉱物からなっており、少量の

表4(c) 岩石の放射線量率

| 分 類 | 岩 石 名 | 産 地 | 放射線量率<br>( $\mu\text{Sv/h}$ ) |
|-----|-------|-----|-------------------------------|
| 火山岩 | 流紋岩   | 五城目 | 0.0552                        |
|     | 安山岩   | 三倉鼻 | 0.0713                        |
|     | 玄武岩溶岩 | 八丈島 | 0.0425                        |
| 深成岩 | 花崗岩A  | 稲田  | 0.167                         |
|     | 花崗岩B  | 土岐  | 0.128                         |
|     | 閃緑岩   | 不明  | 0.0765                        |
|     | ハンレイ岩 | つくば | 0.0314                        |
|     | カンラン岩 | 北海道 | 0.0196                        |
| 変成岩 | 花崗片麻岩 | 三重  | 0.103                         |
|     | 蛇紋岩   | 日立  | 0.0288                        |
| 堆積岩 | 砂 岩   | ベレア | 0.0454                        |
|     | 凝灰岩   | 荻野  | 0.0844                        |
|     | 石灰岩   | 奥多摩 | 0.0202                        |
|     | 石 膏   | 大館  | 0.0323                        |
|     | 石 炭   | 不明  | 0.0529                        |
|     |       |     |                               |

(平均 0.0639)

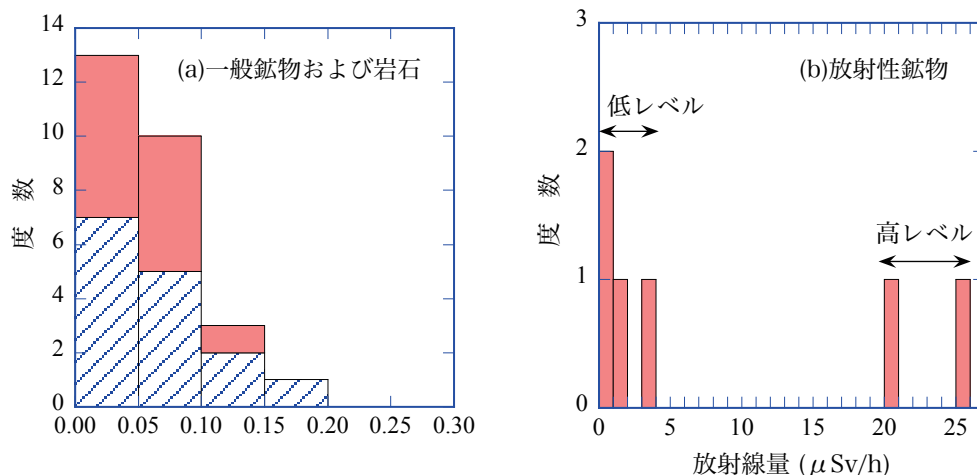


図6 鉱物および岩石の放射線量率の分布

硫化物あるいは酸化物鉱物を含む、一般鉱物の集合体である。両者の分布は、ほぼ同じ傾向となっており、ほとんどの試料は、 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 以下であることがわかった。ただし、放射能汚染とは無関係に、自然放射線量が $0.15 \mu\text{Sv/h}$ を超える岩石(花崗岩)もあることから、骨材の放射能の評価にあたっては、十分に岩石の自然放射線量を考慮しなければならない。

また、図6(b)に、放射性鉱物の放射線量についてのヒストグラムを示す。図より、放射性鉱物であっても、 $1 \mu\text{Sv/h}$ 程度の低レベルなものも多く、自然界において、極めて高レベルな放射線環境となることは希であることがわかる。

#### 4.3 汚染地域における骨材の放射線量

表5に、東北地方の放射能汚染が広まったと考えられる地域における、骨材試料の放射線量率の測定結果を示す。表より、一関市の空間線量率は $0.2 \mu\text{Sv/h}$ 程度であるが、A採石場の砕砂は $0.0516 \mu\text{Sv/h}$ と、汚染されていない岩石の自然放射線量率のレベルであった。同採石場の表土も同程度の

値であったが、場内側溝の石粉等の堆積物は、砕砂の2倍程度の値となり、放射能物質が沈殿している可能性が示唆された。

大郷町の空間線量率は $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 以下で、汚染されていない地域と同レベルである。同町のB採石場の天然砂の値は、十分に低く、自然放射線量率と同じレベルである。

丸森町の空間線量率は $0.5 \mu\text{Sv/h}$ 程度で、汚染の影響が表れている。同町のC採石場のマサ土は、 $0.158 \mu\text{Sv/h}$ であり、自然放射線量の高い花崗岩程度であった。しかし、マサ土を洗浄して測定した結果、 $0.0650 \mu\text{Sv/h}$ に急減したため、汚染の影響が示唆された。

これら汚染が推測されたA採石場の石粉等が堆積した側溝沈殿物とC採石場のマサ土について、放射線のスペクトル分析をおこなった。その結果を図7(a)および(b)に示す。図より、両者には、セシウム137および134のピーク値が検出され<sup>4)</sup>、原発事故由来の放射性セシウムに汚染されていることがわかった。

表5 採石場における採取試料の放射線量率

| 採取場所          | 空間線量率<br>( $\mu\text{Sv/h}$ ) | 試料名          | 放射線量率<br>( $\mu\text{Sv/h}$ ) |
|---------------|-------------------------------|--------------|-------------------------------|
| A採石場<br>(一関市) | 0.2-0.5                       | 砕砂<br>(硬質砂岩) | 0.0516                        |
|               |                               | 沈殿堆積物        | 0.0809                        |
|               |                               | 表土           | 0.0494                        |
| B採石場<br>(大郷町) | < 0.1                         | 天然砂          | 0.0416                        |
| C採石場<br>(丸森町) | 0.5-1.0                       | まさ土<br>(洗浄前) | 0.158                         |
|               |                               | まさ土<br>(洗浄後) | 0.0650                        |

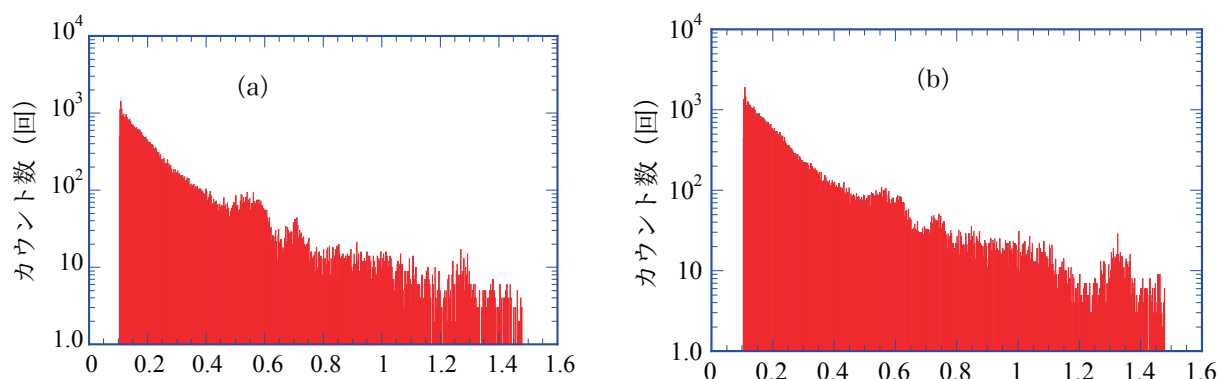


図7 汚染試料の放射線スペクトル

以上の結果から、放射能の汚染地域(A、C)においても、現状では、破碎製品(砕砂・碎石)は汚染されていないが、まさ土や石粉等の堆積物などに、多少の放射能が付着していることがわかった。

## 5. おわりに

本研究では、一般の空間線量測定器を用いて、より正確な岩石試料の放射線量率の測定手法を提案するとともに、典型的な岩石および鉱物の自然放射線量率を測定し、骨材の放射線基準値との関係を明確にした。さらに、汚染地域の採石場において試料を採取し、それらの放射線率を測定することで、採石場の汚染状況について明らかにした。これらの結果をまとめて以下に示す。

- (1) 鉛の遮蔽箱と一般の空間線量測定器を用いて、より正確な岩石試料の放射線量率の測定が可能となることを実証した。
- (2) 一般鉱物および岩石の自然放射線量率は低く、多くは $0.1 \mu\text{Sv/h}$ 以下である。
- (3) 花崗岩類の自然放射線量は比較的高く、 $0.1 \mu\text{Sv/h}$ を超えるものもある。
- (4) 放射性鉱物の放射線量率は、多くは $1 \mu\text{Sv/h}$ 程度で、極めて高レベルなものは少ない。
- (5) 汚染地域のうち、とくに空間線量率の高い地域では、まさ土や石粉等の堆積物などに、多少の放射能の付着がみられたが、新鮮な砕砂・碎石には汚染は無い。

## 謝 辞

本研究は、日本碎石協会の平成24年度研究助成金を得て行われたものであり、ここに記して感謝を申し上げます。また、測定用の岩石・鉱物試料を提供いただきました、秋田大学鉱業博物館および碎石業者の方々に感謝申し上げます。

## 引用文献

- 1) 今井忠男ら(2014)：2014年東日本大震災による福島第一原発事故で生じた放射能汚染の概況と骨材の放射線量基準について、骨材資源、No. 181、pp. 1-5.
- 2) 経済産業省(2012)：碎石及び砂利の出荷基準.
- 3) 湊進(2006)：日本における地表 $\gamma$ 線の線量率分布、地学雑誌、Vol. 115、No. 1、pp. 87-95.
- 4) 日本アイソトープ協会編(2011)：アイソトープ手帳、丸善.
- 5) 文部科学省(2011)：文部科学省及び栃木県による航空機モニタリングの測定結果、7月27日(web公開資料) .

(2017年1月16日受付 2017年5月29日受理)