

Title	ガイガーカウンターを用いた放射線強度測定実験
Sub Title	An experiment on measurement of radiation intensities by using geiger counter
Author	大場, 茂(Oba, Shigeru) 向井, 知大(Mukai, Tomohiro) 小島, りか(Obata, Rika)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2012
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of the natural science). No.51 (2012. 3) ,p.43- 60
JaLC DOI	
Abstract	慶應義塾大学における文系学生を対象とした化学実験のテーマの一つとして、放射線に関する実験を2011年から開始した。放射線検出器は、 $\alpha$ , $\beta$ , および $\gamma$ 線をまとめて検出する簡易型のガイガーカウンターを使用することにした。実験内容は、昆布など身近なものから放射線が出ていることの確認、KClなどから発生している放射線の種類の判別、ならびに放射能鉱物標本からの $\gamma$ 線強度の距離依存性の測定を行う。また、さいころを用いて放射性元素壊変のシミュレーションも行う。この実験テーマに関連して、40Kや232Thの壊変によってどのような放射線が出ているのかを文献で調べ、実際の検出結果と比較し考察した。
Notes	研究ノート
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	<a href="https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20120331-0043">https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20120331-0043</a>

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

## ガイガーカウンターを用いた放射線強度測定実験

大場 茂・向井知大・小島りか

An Experiment on Measurement of Radiation Intensities by Using Geiger Counter

Shigeru OHBA, Tomohiro MUKAI and Rika OBATA

### 概要

慶應義塾大学における文系学生を対象とした化学実験のテーマの一つとして、放射線に関する実験を2011年から開始した。放射線検出器は、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、および $\gamma$ 線をまとめて検出する簡易型のガイガーカウンターを使用することにした。実験内容は、昆布など身近なものから放射線が出ていることの確認、KCl などから発生している放射線の種類の判別、ならびに放射能鉍物標本からの $\gamma$ 線強度の距離依存性の測定を行う。また、さいころを用いて放射性元素壊変のシミュレーションも行う。この実験テーマに関連して、 $^{40}\text{K}$ や $^{232}\text{Th}$ の壊変によってどのような放射線が出ているのかを文献で調べ、実際の検出結果と比較し考察した。

### 1. はじめに

宇宙の始まりは、物質の始まりでもある。ビッグバンは今から137億年前に起こったとされている。<sup>1)</sup>これは現在の宇宙の膨張の様子をもとに理論的にそれを逆算して、1点に集中した状態までさかのぼったときの推定値である。太陽系および地球の誕生は、46億年前とされているが、これは隕石や月の石をウラン鉛年代測定法で調べた結果である。もっと時間スケールが短く、数千年から数万年前の化石などについては、炭素14年代測定法が使用される。その原理は、特定の放射性元素が決まった割合で減少していくので、その減り具合から経過時間がわかるという仕組みである。なお、放射能というと、1945年8月に広島と長崎に原爆が投下され、

---

慶應義塾大学自然科学研究教育センター（〒223-8521 横浜市港北区日吉4-1-1）: Research and Education Center for Natural Sciences, Keio University, Hiyoshi 4-1-1, Kohoku-ku, Yokohama 223-8521, Japan. [Received Sep. 13, 2011]

数十万人が死亡するとともに放射線障害が引き起こされたことは避けて通れない事実である。その核燃料はウラン235とプルトニウム239であり、現在、原子力発電で使用しているものおよび高速増殖炉で使用を計画しているものとそれぞれ同じ核種である。ただし、放射線は目に見えないだけで、我々は、弱いながらも自然放射線で取り囲まれている。しかし、この事実は、意外と知られていない。放射線に対して、正しい認識を持ち、またそれをうまく利用していくためにも、学生実験のテーマとして取り上げることにした。こうしている中、2011年3月に東日本大震災がおり、福島原発事故による放射能漏れが発生した。この深刻な事態を受けて、放射線に対する知識の必要性が切実なものとなってしまった。

## 2. 放射性崩壊と自然放射線

### 2-1. 崩壊の型と放射線の放出

不安定な核種はある一定の確率のもと、放射線を放出しながら別の核種に変化していく。この原子の壊変には $\alpha$ 崩壊、 $\beta$ 崩壊（電子と陽電子とを区別するために、それぞれ $\beta^-$ 崩壊、 $\beta^+$ 崩壊という）などがある。 $\alpha$ 崩壊の場合、原子核からHeの原子核が放出される。このため、原子番号が2、質量数が4だけ減少する。放出される $\alpha$ 線のエネルギーは崩壊する核種によって決まっており、一定である。 $\beta^-$ 崩壊の場合は、原子核中で1個の中性子が陽子となり、電子が放出される。このため、原子番号が1だけ増えるが、質量数は変わらない。その $\beta$ 線のエネルギーは最大値で表されるが、それは同時に放出される反ニュートリノのエネルギーによって、電子のエネルギーが違ってくるからである。<sup>2)</sup>  $\gamma$ 線が放出されるのは、崩壊によって生じた原子核が、より安定な状態へと変化するときである。

天然に存在するカリウムのうち、放射性であるのは $^{40}\text{K}$ であり、その存在比はわずかに0.0117%である（表1）。この $^{40}\text{K}$ が壊変する際の状況を図1に示す。 $^{40}\text{K}$ の壊変のうちの89%は $\beta^-$ 崩壊であり、 $\beta$ 線を出して $^{40}\text{Ca}$ に変る。残りの11%はEC（電子捕獲）であり、核外電子が原子核に捕獲され、核内の陽子が中性子に変る。この原子核がさらに安定な状態に移る際に、 $\gamma$ 線（1.46 MeV）が放出される。<sup>4)</sup>

トリウムについては $^{232}\text{Th}$ の存在比が100%であるが、 $^{40}\text{K}$ の場合とは異なり、10段階の逐次

表1. カリウム同位体の存在比と放出される放射線<sup>3)</sup>

同位体の存在比（および半減期）*	壊変形式（および比率）	放出される放射線	生じる核種**
$^{39}\text{K}$ 93.2581%	—		
$^{41}\text{K}$ 6.7302%	—		
$^{40}_{19}\text{K}$ 0.0117% ( $1.277 \times 10^9$ 年)	$\beta^-$ (89.28%)	$\beta^-$	$^{40}_{20}\text{Ca}$
	EC (10.72%)	$\gamma$	$^{40}_{18}\text{Ar}$

\*  $^{39}\text{K}$  と  $^{41}\text{K}$  の半減期は $\infty$ （つまり安定な核種）。

\*\*  $\beta^-$  壊変では原子番号が1つ増え、電子捕獲（EC）では原子番号が1つ下がる。

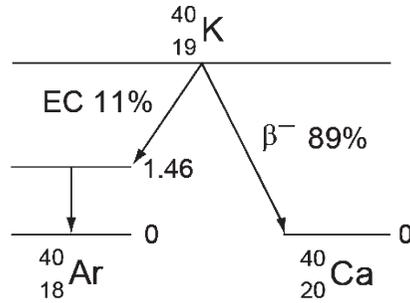


図1.  $^{40}\text{K}$ の壊変。2通りの可能性があり、89%が $\beta^-$ 壊変で11%が電子捕獲(EC)である。ECのときは、よりエネルギーの低い状態へ移る際に1.46 MeVの $\gamma$ 線が放出される。<sup>4)</sup>

表2. トリウム系の逐次崩壊系列

No.	核種の半減期 <sup>3), 5)</sup>	壊変形式 (および比率)	主な放射線のエネルギー (MeV)**	生じる核種
1	$^{232}_{90}\text{Th}$ 1.405×10 <sup>10</sup> 年 *	$\alpha$ (100%)	$\alpha$ 4.02 (77), 3.96 (23); $\gamma$ 0.059	$^{228}_{88}\text{Ra}$
2	$^{228}_{88}\text{Ra}$ 5.75年	$\beta^-$ (100%)	$\beta^-$ 0.039 (60) 他; $\gamma$ 0.014他	$^{228}_{89}\text{Ac}$
3	$^{228}_{89}\text{Ac}$ 6.13時間	$\beta^-$ (約100%)	$\beta^-$ 1.11 (53) 他; $\gamma$ 0.91 (27) 他	$^{228}_{90}\text{Th}$
4	$^{228}_{90}\text{Th}$ 1.913年	$\alpha$ (100%)	$\alpha$ 5.42 (73) 他; $\gamma$ 0.084他	$^{224}_{88}\text{Ra}$
5	$^{224}_{88}\text{Ra}$ 3.66日	$\alpha$ (100%)	$\alpha$ 5.69 (95) 他; $\gamma$ 0.241 (4) 他	$^{220}_{86}\text{Rn}$
6	$^{220}_{86}\text{Rn}$ 55.6秒	$\alpha$ (100%)	—*	$^{216}_{84}\text{Po}$
7	$^{216}_{84}\text{Po}$ 0.145秒	$\alpha$ (100%)	—	$^{212}_{82}\text{Pb}$
8	$^{212}_{82}\text{Pb}$ 10.64時間	$\beta^-$ (100%)	$\beta^-$ 0.57他; $\gamma$ 0.239 (43) 他	$^{212}_{83}\text{Bi}$
9	$^{212}_{83}\text{Bi}$ 60.6分	$\beta^-$ (64.1%)	—	$^{212}_{84}\text{Po}$
		$\alpha$ (35.9%)	—	$^{208}_{81}\text{Tl}$
10-1	$^{212}_{84}\text{Po}$ 0.299×10 <sup>-6</sup> 秒	$\alpha$ (100%)	—	$^{208}_{82}\text{Pb}$
10-2	$^{208}_{81}\text{Tl}$ 3.053分	$\beta^-$ (100%)	$\beta^-$ 1.80, 1.20他; $\gamma$ 2.615他	$^{208}_{82}\text{Pb}$
11	$^{208}_{82}\text{Pb}$ ∞ (安定)	—	—	—

\* トリウムの同位体の存在比は、 $^{232}\text{Th}$ が100%。

\*\*  $\alpha$ 線と $\gamma$ 線は固有なエネルギー値であるが、 $\beta$ 線は最大エネルギー値である。カッコ内の数字は、壊変あたりその放射線が放出される割合 (%) を示す。<sup>3)</sup>

\* データ不明。

反応を経て、最終的に $^{208}\text{Pb}$ となる(表2)。この原子の一連の壊変は $\alpha$ 崩壊と $\beta^-$ 崩壊とからなる。原子の質量数に着目すると、 $\beta^-$ 崩壊では質量数が変わらないが、 $\alpha$ 崩壊では4だけ減る。 $^{232}\text{Th}$ から始まる一連の放射性核種をトリウム系列と呼ぶが、質量数がいずれも4の倍数なので4n系列ともいう。 $^{238}\text{U}$ から始まるウラン系列は4n+2系列、 $^{235}\text{U}$ から始まるアクチニ

表 3. ウランの同位体の存在比と半減期<sup>3)</sup>

同位体	存在比 (wt%)	半減期	逐次崩壊の系列
<sup>234</sup> U	0.0055	24.5万年	—
<sup>235</sup> U	0.72	7.04億年	アクチニウム系列 (4n+3系列)
<sup>238</sup> U	99.27	44.7億年	ウラン系列 (4n+2系列)

表 4. ウラン238の逐次崩壊系列

No.	核種の半減期 <sup>3), 5)</sup>	壊変形式 (および比率)	主な放射線のエネルギー (MeV)*	生じる核種
1	<sup>238</sup> <sub>92</sub> U 4.47×10 <sup>9</sup> 年	α (100%)	α 4.20 (77) 他; γ 0.050 (0.3) 他	<sup>234</sup> <sub>90</sub> Th
2	<sup>234</sup> <sub>90</sub> Th 24.1日	β <sup>-</sup> (100%)	β <sup>-</sup> 0.020 (73) 他; γ 0.113 (0.2) 他	<sup>234m</sup> <sub>91</sub> Pa**
3	<sup>234m</sup> <sub>91</sub> Pa 1.17分	β <sup>-</sup> (100%)	—*	<sup>234</sup> <sub>92</sub> U
4	<sup>234</sup> <sub>92</sub> U 2.46×10 <sup>5</sup> 年	α (100%)	α 4.77 (72), 4.72 (28) 他; γ 0.053他	<sup>230</sup> <sub>90</sub> Th
5	<sup>230</sup> <sub>90</sub> Th 7.54×10 <sup>4</sup> 年	α (100%)	α 4.69 (76), 4.62 (23); γ 0.068他	<sup>226</sup> <sub>88</sub> Ra
6	<sup>226</sup> <sub>88</sub> Ra 1.60×10 <sup>3</sup> 年	α (100%)	α 4.79 (94) 他; γ 0.186 (3)	<sup>222</sup> <sub>86</sub> Rn
7	<sup>222</sup> <sub>86</sub> Rn 3.82日	α (100%)	α 5.49 (99.9) 他; γ 0.510 (0.07)	<sup>218</sup> <sub>84</sub> Po
8	<sup>218</sup> <sub>84</sub> Po 3.10分	α (約100%)	—	<sup>214</sup> <sub>82</sub> Pb
9	<sup>214</sup> <sub>82</sub> Pb 26.8分	β <sup>-</sup> (100%)	β <sup>-</sup> 0.73; γ 0.352 (37) 他	<sup>214</sup> <sub>83</sub> Bi
10	<sup>214</sup> <sub>83</sub> Bi 19.9分	β <sup>-</sup> (約100%)	—	<sup>214</sup> <sub>84</sub> Po
11	<sup>214</sup> <sub>84</sub> Po 1.64×10 <sup>-4</sup> 秒	α (100%)	—	<sup>210</sup> <sub>82</sub> Pb
12	<sup>210</sup> <sub>82</sub> Pb 22.3年	β <sup>-</sup> (約100%)	β <sup>-</sup> 0.017; γ 0.047	<sup>210</sup> <sub>83</sub> Bi
13	<sup>210</sup> <sub>83</sub> Bi 5.01日	β <sup>-</sup> (約100%)	β <sup>-</sup> 1.16; γ 0.266	<sup>210</sup> <sub>84</sub> Po
14	<sup>210</sup> <sub>84</sub> Po 138日	α (100%)	α 5.31; γ 0.804 (0.001)	<sup>206</sup> <sub>82</sub> Pb
15	<sup>206</sup> <sub>82</sub> Pb ∞ (安定)	—	—	—

\* α線とγ線は固有なエネルギー値であるが、β線は最大エネルギー値である。カッコ内の数字は、壊変あたりその放射線が放出される割合 (%) を示す。<sup>3)</sup>

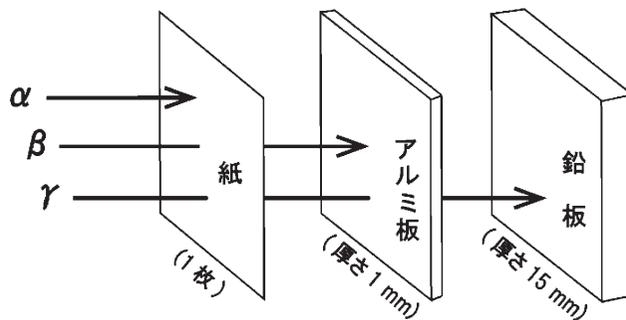
\*\* 質量数が234mとなっているが、このmは質量数が同じでもエネルギーの異なる核異性体を意味する。

\* データ不明。

ウム系列は4n+3系列とも呼ばれる。<sup>2)</sup> 表3に示すように、天然に存在するウランのほとんどは<sup>238</sup>Uであり、これは14段階の反応を経て<sup>206</sup>Pbに至る(表4)。

## 2-2. 放射線の性質

α, β, γ線の物質に対する透過性の違いは、図2のように表すことができる。大まかにいうと、α線は紙1枚、β線は1mm程度アルミ板で遮断される。γ線を遮断するには、数センチもの厚さの鉛板が必要になる。以下にそれぞれ、詳しく説明する。



※アルミ板の代わりに、プラスチック板 (厚さ数 mm ~ 1 cm) でもよい。

図2.  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  線の物質に対する透過性の違い

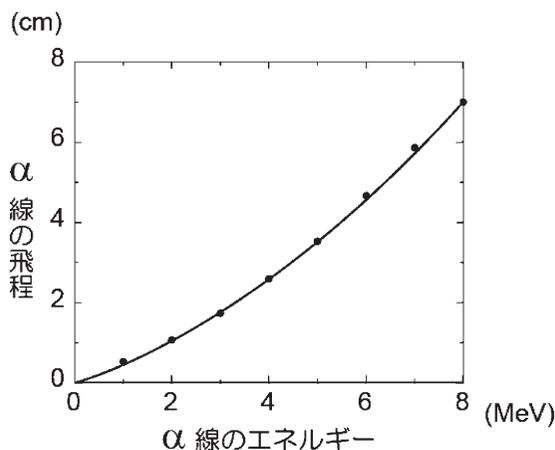


図3.  $\alpha$  線の空気中の飛程<sup>2)</sup>

$\alpha$  線は物質に入射すると、その一部は物質中の原子核との反発によって弾性散乱されるが、大部分は直進する。 $\alpha$  線は電荷をもった質量の大きい粒子であり、物質中を通過する際に、原子の電子を引きはがしたり、励起したりする。それに伴い、運動エネルギーが急速に減少する。運動を停止した $\alpha$  線は、周囲から電子を得て、ヘリウム原子となる。<sup>4)</sup>  $\alpha$  線は物質との相互作用が強く、空気中でさえ数 cm 程度しか進めない。 $\alpha$  線のエネルギーが大きい程、空気中の到達距離 (これを飛程という) が長くなる (図3)。<sup>2)</sup>  $\alpha$  線の飛程は、物質の密度に反比例して短くなるため、空気に比べて、液体あるいは固体中の飛程は3桁ほど小さくなる。<sup>6)</sup> このため、 $\alpha$  線は紙1枚でほとんど止まる。つまり、それだけ物質との相互作用が強いということであり、人体に対する内部被ばくによる毒性は、 $\beta$  線や $\gamma$  線に比べて $\alpha$  線の方が数段大きいので、注意を要する。

$\beta$  線も、物質中の原子の核外電子と静電的な相互作用を起して、電離や励起を引き起こすが、 $\beta$  線は質量が小さいため、進む方向が曲がり、ジグザク運動となる。空気中の飛程は数 m 程

度である。例えば<sup>85</sup>Krからのβ線 ( $E_{\max}=0.67$  MeV) の飛程 (最大値) は、空气中1.9 m, 水中2.5 mm, アルミ中では0.9 mmである。<sup>6)</sup> β線のエネルギーは一定ではなく、連続スペクトルである。このため、物質による吸収の程度は、単一エネルギーの電子線のときとは異なる。β線が物質に入射すると、エネルギーの低い電子から順に遮断されていく。このような複雑な状況にも関わらず、物質によるβ線の吸収は、実際に単純な指数関数で近似できることがわかっている。<sup>6)</sup> 入射線の強度を  $I_0$ , 厚さ  $x$  の物質 (線吸収係数  $\mu$ ) を通過した後の強度を  $I$  とすると、次のように書ける。

$$I=I_0 \exp(-\mu x) \quad (1)$$

物質の厚さを非常に薄くして  $\Delta x$  としたときは、次のように近似できる。

$$I/I_0=\exp(-\mu \Delta x) \approx 1-\mu \Delta x \quad (2)$$

図2において、β線はあたかも紙を素通りしているかのように見えるが、幾分減衰している。(2)式より、紙によるβ線の強度減衰の程度は紙の枚数に比例すると推定できる。

原子の壊変によって生じるγ線のエネルギーは一定であり、その値 (つまり波長) に応じて、物質に対する線吸収係数  $\mu$  が決まってくる。物質を通過したことによる強度減衰は、式(1)で表せる。γ線と物質との相互作用は、低エネルギー領域 (およそ0.1 MeV以下) では光イオン化が、中エネルギー領域 (1~3 MeV) ではコンプトン散乱が、そして高エネルギー領域 (およそ10 MeV以上) では電子対創生が支配的となる。<sup>6)</sup> 本実験では、中エネルギー領域以下のγ線を扱うので、話をそこに限定すると、一般的に物質の原子番号が大きい程、そしてγ線のエネルギーが小さい程、γ線が物質を透過しにくくなるといえる。

### 2-3. 崩壊の速さ

基本的に原子の壊変は1次反応である。原子Aの濃度を  $[A]$  とし、それが反応速度  $k_1$  で原子Bに変っていくとすると、その放射能の強さ (単位時間あたりの崩壊数) は次式のように表すことができる。

$$-d[A]/dt=k_1 [A] \quad (3)$$

また、時間  $t=0$  におけるAの濃度を  $[A]_0$  とすると、時間  $t$  におけるAの濃度は次のように書ける。

$$[A]=[A]_0 \exp (-k_1 t) \quad (4)$$

$[A]=[A]_0 / 2$  となる時間 ( $t_{1/2}$ ) を半減期という。1次反応のときは、半減期は濃度  $[A]$  に依存しない。

$$t_{1/2}=\ln 2 / k_1 \quad (5)$$

(5) 式から  $k_1$  を求め、(3) 式に代入すると次のようになる。

$$-d[A]/dt = [A] \ln 2 / t_{1/2} \quad (6)$$

つまり、放射能の強さと半減期とが反比例する。

A → B → C の逐次反応については、ある程度時間がたつと平衡状態となる。娘の核種 B に比べて、親原子 A の半減期が長いとき、親から生じた娘は親と同じ半減期で減衰するようになる。これを過渡平衡という。さらに、娘の核種に比べて、親原子の半減期が桁はずれに長いとき、娘の放射能の強さは親と同じになる。これを永続平衡という。<sup>4)</sup> ウラン系列については永続平衡がなりたち、これに含まれている全ての核種について、放射能の強さがほぼ等しいことが知られている。<sup>2)</sup> トリウム系列についても、<sup>232</sup>Th の半減期が娘核種等に比べて非常に長いので、永続平衡がなりたっていると推定される。

#### 2-4. 自然放射線

自然の状態で微量に存在する放射線を自然放射線という。自然放射線による被ばくは、世界の平均で年間2.4 mSv であるが(表5)、日本ではそれよりも低く、年間で0.5~1.1 mSv である。<sup>6)</sup> 1.1 mSv/y を1時間あたりに直すと、 $1.1 \times 10^3 / (365 \times 24) = 0.13$  ( $\mu$ Sv/hr) となる。ただし、線量計で測定できるのは、外部被曝の部分だけである。シーベルト(記号 Sv)とは、放射線が人間や生物に与える影響の大きさを表す単位である。生体に対する放射線の影響の強さは、放射線の種類とエネルギーによって異なることを考慮して、放射線の吸収量に係数をかけて足し合わせたものである。なお、国際放射線防護委員会は、一般公衆が受ける放射線(自然由来および医療目的以外)の限度を1年間に1 mSv と定めている。<sup>7)</sup>

自然放射線の原因は大きくわけて二つあり、その一つは地殻中に含まれるウランやトリウムおよびそれ等から生じる放射性元素である。もう一つは、宇宙線である。これは太陽から発せられているものの他、太陽系外における超新星爆発に由来する。<sup>7)</sup> この1次宇宙線は主に陽子(約89%)と He の原子核(9%)とからなり、He より重い原子核(Li~Ni, 約1%) も含まれている。<sup>6)</sup> 地上における宇宙線の影響は、地球磁場と大気によってシールドされているため、

表5. 自然放射線源による被ばく(世界の平均値)<sup>2)</sup>

分類	原因	自然放射線による被ばく線量 (mSv/年)	線量計で測定できる部分
外部被曝	宇宙線	0.38	○
	大地等	0.46	○
内部被曝	空気中のラドン等の吸入*	1.28	
	食物摂取	0.24	
	合計	約2.4	

\*自然放射線の約半分は、空気中のラドン(<sup>222</sup>Rn等)が壊変して生成した核種の吸入による。

宇宙に比べて弱くなっている。1次宇宙線が大気中の窒素や酸素と衝突して2次宇宙線が散乱される。その組成は $\mu$ 粒子(約3/4)と電子(1/4)であり、陽子や $\gamma$ 線も含まれている。<sup>6)</sup>宇宙線による影響は上空になるほど強くなるため、高度約400 kmの国際宇宙ステーションでの被ばく線量は、地上の150倍にも達するという。<sup>8)</sup>

放射線を大量に浴びると障害が出るが、ごく微量の放射線をあびた場合は、逆に免疫力が活性化するという説もある(ホルミシス効果)。ただし、低い被爆線量による人体への影響は、まだ十分にはわかっていない。学説には大きく分けて、放射線の吸収量に比例して危険度が上がっていくという直線仮説と、あるしきい値を越えなければ影響がでないという説とがあり、世界的論争となっている。<sup>7)</sup>なお、放射線は、医療や工業だけでなく、農業の分野にも利用されている。例えば、ジャガイモの発芽防止などに $\gamma$ 線が使用され、また、農作物の生産性を改善するために、放射線を用いた品種改良が行われている。<sup>7), 9)</sup>

### 3. 実験条件の検討

#### 3-1. ガイガーカウンターの特性

放射線の検出がクリック音で実感でき、また定量的な計測にも対応できるような測定器をさがした。そして、ガイガーカウンター式で比較的精度が良い機種として、アメリカのS.E.International社製のInspector<sup>+</sup>(インスペクター)を選んだ(図4)。<sup>10)</sup>これは $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 線がすべて統合された形で計測されるが、ステンレス製のテストプレート(これ以降は鉄板とよぶ)を検出窓にはめると、 $\gamma$ 線のみを測定できるようになっている。なお、ガイガーカウ

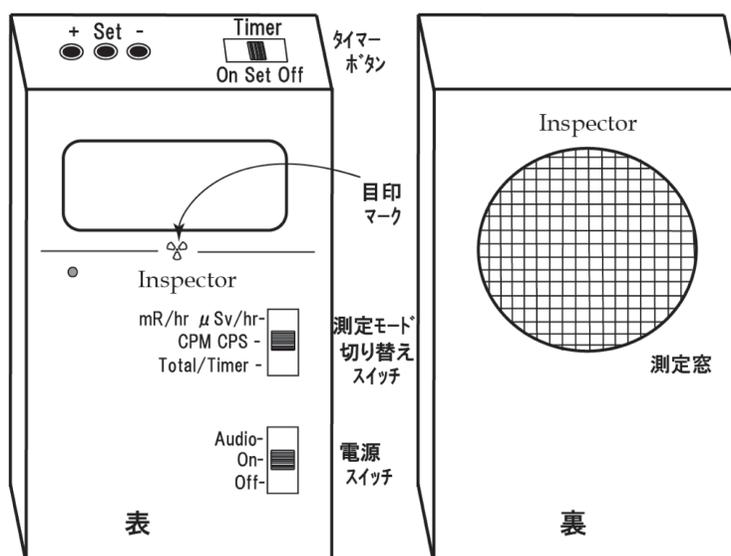


図4. 放射線検出器インスペクターの外観とスイッチ類

表 6. インスペクター (Inspector<sup>+</sup>) の検出効率<sup>10)</sup>

同位体	壊変形式 (および比率)	主な放射線のエネルギー (MeV)*	効率**
<sup>241</sup> Am	$\alpha$ (100%)	$\alpha$ 5.486 (86), 5.443 (13) 他; $\gamma$ 0.06 (36) 他	18%
<sup>14</sup> C	$\beta^-$ (100%)	$\beta^-$ 0.157; $\gamma$ なし	5% <sup>**</sup>
<sup>210</sup> Bi	$\beta^-$ (約100%)	$\beta^-$ 1.16; $\gamma$ 0.266 他	32%
<sup>90</sup> Sr (Y)	$\beta^-$ (100%)	$\beta^-$ 0.546; $\gamma$ なし	38%
<sup>32</sup> P	$\beta^-$ (100%)	$\beta^-$ 1.711; $\gamma$ なし	33%
<sup>57</sup> Co	EC (100%)	$\gamma$ 0.014 (10), 0.122 (86), 0.137 (11)	0.3%

\*  $\alpha$ 線と $\gamma$ 線は固有なエネルギー値であるが、 $\beta$ 線は最大エネルギー値である。カッコ内の数字は、壊変あたりその放射線が放出される割合 (%) を示す。<sup>3)</sup>

\*\* サンプルと検出器との距離が0で、立体角 $4\pi$ としたときの検出効率である。

\*  $\beta$ 線の検出可能なエネルギーの下限が0.16 MeV 付近のため、<sup>14</sup>Cの検出効率が低い。なお、 $\alpha$ 線と $\gamma$ 線の検出可能なエネルギーの下限は、それぞれ2 MeV と0.01 MeV 付近である。<sup>10)</sup>

ントーの一般的な特性として、 $\alpha$ 線や $\beta$ 線はほぼ100%計測されるのに、 $\gamma$ 線は0.1~1% (高々数%)しか計測されない。これは、ガイガー管に封入されている気体と $\gamma$ 線との相互作用が弱いから、ほとんどの $\gamma$ 線が素通りしてしまうからである。<sup>6)</sup> 同じガイガーカウンターとはいえ、インスペクターは簡易型なのでもっと検出効率は低く、1 MeVの $\beta$ 線で30%程度であり、5 MeVの $\alpha$ 線に対しても20%程度である(表6)。なお、インスペクターの測定モードで $\mu\text{Sv/hr}$ 単位を選んだときに表示される値は、放射線が<sup>137</sup>Csからの $\gamma$ 線であると仮定してカウント数を換算しているだけなので、相対的な放射線の強さの目安にしすぎない。<sup>10)</sup>

ガイガーカウンターは、一般に $\beta$ 線に対する感度は高いが、分解時間が100 $\mu\text{s}$ 程度と長いから、計数率が高いと数え落としが起きてしまう。測定値をN(cps)とし、分解時間を $\tau$  (s)とすると、真の係数率 $N_0$ は次式から計算できる。<sup>4)</sup>

$$N_0 = N / (1 - N\tau) \tag{7}$$

これに $N=167$  (cps),  $\tau=1.0\times 10^{-4}$  (s)を代入すると、 $N_0=170$  (cps)となる。つまり、10000 cpmの強度では、数え落としが2%程度生じる可能性がある。インスペクターでは、数え落とし補正が自動的になされる。<sup>10)</sup>

### 3-2. 測定材料

身近な物の例として、昆布から放射線が出ていることを確認することにした。昆布から発生する放射線の主たる原因は<sup>40</sup>Kである。表1に示すように、自然に存在するカリウムの中で放射性のものは<sup>40</sup>Kだけであり、その存在比は0.0117%と非常に少ない。乾燥昆布にはカリウムが豊富に含まれているが、それでも重量比からすると3~7%程度である。<sup>11)</sup> そこで、<sup>40</sup>Kからの放射線を検査しやすくするために、KClの粉末をビニールの小袋に入れて使うことにした。

表7. 放射能鉱物標本

鉱物名	産地*	化学成分*
ユークセン石	Arendal, Norway	(Y, Ca, Ce, U, Th)(Nb, Ta, Ti) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>
モナズ石	Bahia, Brazil	(Ce, La, Nd, Th)PO <sub>4</sub>
ベタフォ石	Betafo, Madagascar	(Ca, Na, U) <sub>2</sub> (Ti, Nb, Ta) <sub>2</sub> O <sub>6</sub> (OH)

\* 標本店（鉱物・化石 やまもと）からの資料による。

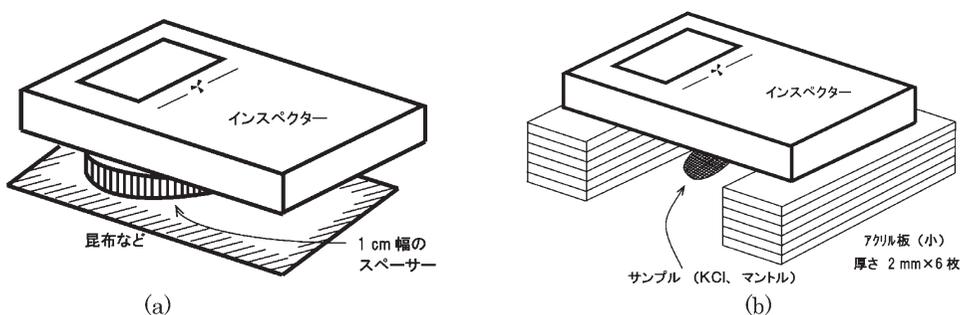


図5. インスペクターを使つての測定。(a) 1 cmの距離を保つて計測する場合, (b) サンプルからの距離を一定に保ちながら, 途中に遮蔽材を入れる場合。

表1からわかるようにカリウムから放出されるのは $\beta$ と $\gamma$ 線だけであり,  $\alpha$ 線は生じない。

放射能鉱物標本については, さすがに放射線強度の強過ぎるものは避けて, ユークセン石, モナズ石, ベタフォ石を15~30個ずつ標本店から購入した。それらの産地および化学成分を表7に示す。ただし, 同じ鉱物名でも産地によって組成が違ってくる。例えば種々のモナズ石の成分を分析した結果によると, ThO<sub>2</sub>の含有量は5~27 wt%で, かなりの幅がある (UO<sub>2</sub>の含有量は1 wt%程度)<sup>12)</sup>。放射能鉱物標本は, 主に $\gamma$ 線の距離依存性測定用であり, この他に $\alpha$ 線を放出するサンプルが望まれた。そして, 霧箱による放射線の軌跡の観測実験用線源として, マントルが使用されていることを知り, CAPTAIN STAG (パール金属) 製のものを試すことにした。マントルとは, ガス (あるいはガソリン) を燃料として用いる, アウトドア用の照明器具ランタンの芯のことである。市販されているマントルは白い繊維からなる網状の袋で, それをバーナーにとりつけ, 事前に火であぶって灰化させてから使用する。マントルにガスがたまり, それに火がついて発光する仕組みになっているが, 炎を白っぽくみせるためにマントルに微量のトリウムが混ざっている場合がある。<sup>7)</sup> 天然のトリウムの存在比は<sup>232</sup>Thが100%であり, それは $\alpha$ 崩壊する (表2)。しかし, 娘核種<sup>228</sup>Raさらに孫核種<sup>228</sup>Acなどは比較的寿命が短く,  $\beta^-$ 崩壊する。よつて, マントルからは,  $\alpha$ 線だけでなく $\beta$ 線もかなり出ていると推定される。

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 線を区別するには, 遮蔽材を入れたときの放射線の減衰の程度から判断できるはずである。 $\beta$ 線を完全に遮断するには, 厚さ1 mmのアルミ板, あるいは厚さ数mm~1 cmのプラスチック板が必要である (図2)。遮蔽の効果を確認するためには, 数枚重ねてやつと

遮断できるようにしておいた方がよい。そこで、アルミ板は厚さ0.5 mm、アクリル板は厚さ2 mm のものを用意することにした。また、サンプルと計測器の間の距離を一定に保つために、スペーサーが必要である。そこで、図5 (b) のようなブリッジを作るためのアクリル板 (小) も用意した。なお、遮蔽材として紙も用いるが、150枚で約15 mm であるから、紙1枚の厚さは0.10 mm 程度である。昆布など身近な物を測定する際のスペーサーとしては、1 cm 幅の両面テープの輪を用いることとした (図5 (a))。

### 3-3. 昆布と KCl およびマン托ルからの放射線強度の測定

サンプルから出ている放射線強度の予備測定を行った。昆布、KCl およびマン托ルを図5 (b) のようにブリッジの下に置き、そのサンプルの表面からインスペクターの測定窓までの距離を約9 mm に固定し、その間に入れる遮蔽材の種類や厚さを変えて放射線強度を計測した。バックグラウンドは5分間くりかえし計測しても、33~38 cpm 程度の変動をみせるので、バックグラウンドを差し引かないで生のデータをそのまま示すこととした (表8)。昆布については、元々シグナルが強くないので、統計変動の影響に埋もれてしまいそうであるが、それでも数枚の紙ではあまり遮蔽されず、アルミ板やアクリル板では1枚でも遮蔽の効果がみられた。KCl についても同様であり、数枚の紙ではあまり減衰せず、アルミ板 (厚さ0.5 mm) 3枚、

表8. 昆布、KCl およびマン托ルからの放射線強度の測定例

遮蔽材	強度 (cpm)*		
	昆布	KCl	マン托ル
なし	56	386	3837
紙1枚	56	380	3304
紙2枚	53	338	2916
紙3枚	53	294	2698
アルミ板1枚	44	112	1146
アルミ板2枚	39	52	457
アルミ板3枚	36	44	243
アルミ板4枚	37	43	141
アクリル板1枚	38	65	570
アクリル板2枚	35	50	152
アクリル板3枚	30	40	103
アクリル板4枚	35	34	96

\* サンプル表面から測定窓までの距離を約9 mm に固定し、その間に遮蔽材を入れて、1分間測定した。ただし、昆布からの放射線は弱いため、5分間計測して平均値を求めた。サンプルはビニール袋に入れたまま測定した。アルミ板は厚さ0.5 mm、アクリル板は2 mm である。バックグラウンドは5分間を4回測定したが、33~38 cpm であった。

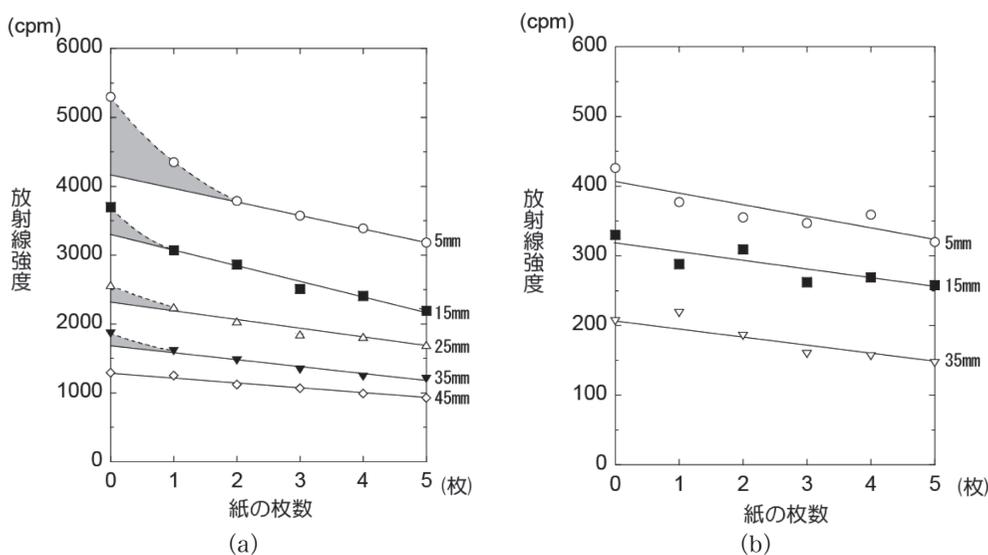


図6. (a) マントルと、(b) KClからの放射線の紙による減衰の程度と距離依存性。サンプルはビニール袋に入れていない状態でブリッジの下に置き、ブリッジの高さを段階的に変え（5～45 mm）、遮蔽材としての紙の枚数を増やしながらか鉄板なしで1分間ずつ計測した。図中で影をつけた部分は、紙の枚数に応じて一定の割合で減衰していく部分からはずれる領域であり、 $\alpha$ 線の寄与と推定される。

あるいはアルリル板（厚さ 2 mm）3 枚でほぼ完全に遮断された。つまり、 $^{40}\text{K}$  から放出される放射線は主に  $\beta$  線であり、 $\alpha$  線は含まれていないことと良く対応している。マントルについては、紙 1 枚でも遮蔽の効果があることは明らかである。しかし、アルミ板（あるいはアクリル板）1 枚を入れてもまだかなり透過する成分があり、その枚数を増やす毎に強度が減衰することから、 $\beta$  線も相当含まれていることがわかった。アクリル板を 4 枚入れても、バックグラウンドのレベルよりもまだ高い。

紙 1 枚でも、 $\alpha$  線だけでなく  $\beta$  線も減衰しているはずである。また、 $\alpha$  線は透過性が低く、空気中の飛程は数 cm しかないことが知られている。サンプルをビニール袋に入れてあると、それだけでも  $\alpha$  線が遮断されてしまう。そこで、マントルをむき出しの状態にしてブリッジの高さを 5 mm から始めて 60 mm まで増やし、それぞれの高さで紙の枚数による遮蔽の効果を測定した。比較のために、同様の測定を KCl についても行った（図 6）。薄い紙による  $\beta$  線の減衰は、式（2）に示したように紙の枚数に比例するはずである。KCl からの放射線強度はそれほど高くないため、統計変動の影響が強いが、図 6（b）に示すように、紙の枚数に比例して強度が減衰しているといえる。それに比べてマントルの方は、近距離の 5 mm では特に、この直線関係からずれており、遮蔽材がない場合に  $\alpha$  線も検出されていると考えられる。15～35 mm の距離においては、 $\alpha$  線は紙 1 枚で完全に遮断されており、45 mm 以上の距離では、 $\alpha$  線はほとんど検出器まで届いていないと推定される。

3-4. 放射能鉱物標本からの放射線強度の測定

放射能鉱物標本, (a) ベタフォ石, (b) モナズ石, (c) ユークセン石から出ている放射線はインスペクターを用いて, 主になにが検出できるのか調べるために, 遮蔽材による減衰の効果を測定した (図7)。ブリッジをつくり, サンプルの表面から検出器の測定窓までの距離を15 mmに保ち, 遮蔽材を変えて, 放射線強度を鉄板なしで1分間2回ずつ計測し, 平均値を求めた。いずれの鉱物についても, 紙の枚数と減衰の程度は比例した。また, アルミ板4枚 (合計の厚さ2 mm) で, 鉄板1枚と同程度の強度まで低下している。このことから, 主に計測されているのは $\beta$ 線であるといえる。マンツルするときと違い,  $\alpha$ 線の寄与は見出せなかった。

放射線の強さは, 鉱物の種類によってももちろん異なる。しかし, 石の形や大きさにもよるかもしれない。そこで, ベタフォ石の標本15個について, それぞれ机の上でできるだけ石の平らな方向に向け, 放射線強度と質量ならびに断面積との関係を調べた (図8)。ブリッジの高さ

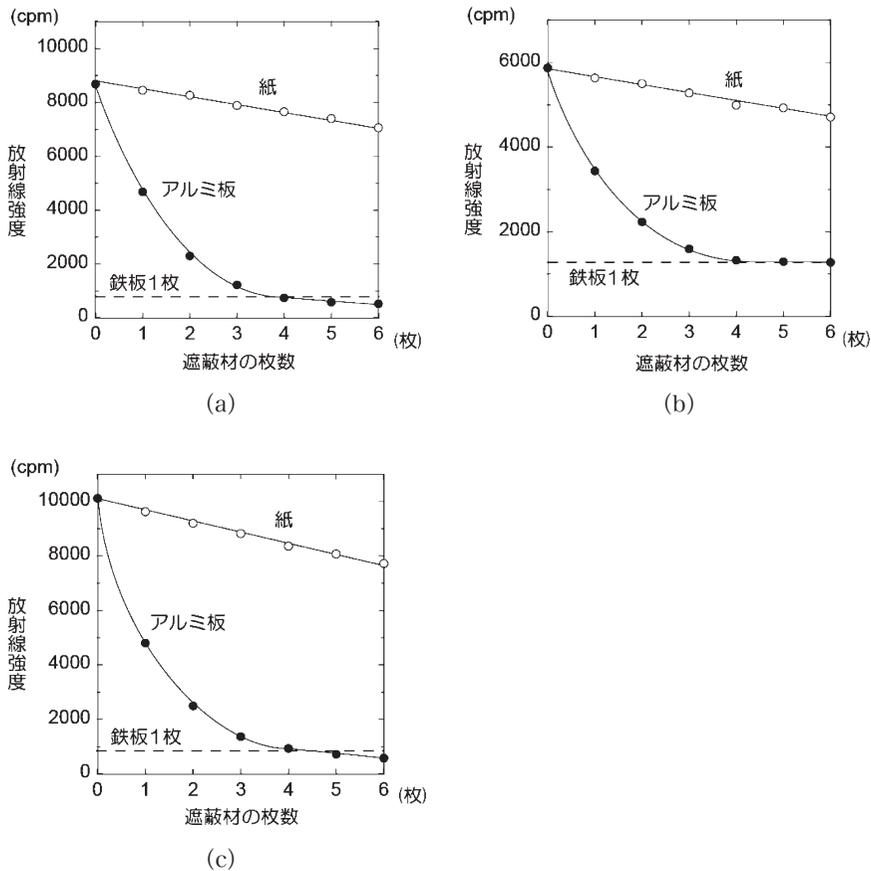


図7. (a) ベタフォ石, (b) モナズ石, (c) ユークセン石から出ている放射線強度の遮蔽材による減衰。ブリッジによってサンプルの表面から検出器の測定窓までの距離を15 mmに保ち, 遮蔽材を変えて, 放射線強度を鉄板なしで1分間2回ずつ計測し, 平均値を求めた。

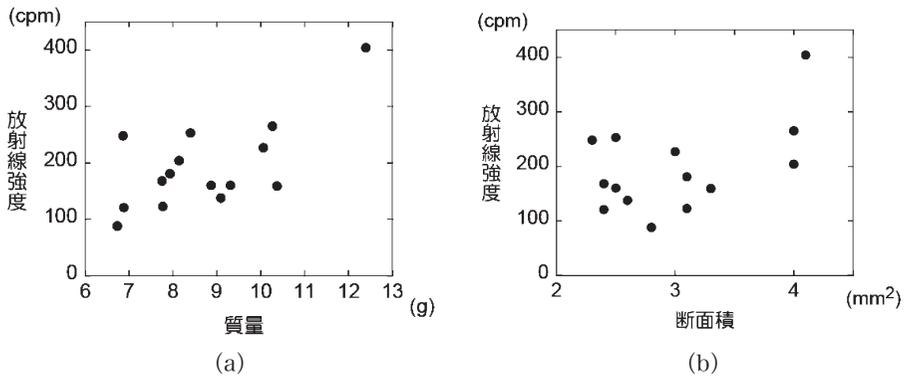


図8. ベタフォ石の放射線強度に対する (a) 質量と, (b) 断面積との関係。15個のサンプルについて、ブリッジの高さを10 cmとし、鉄板ありで1分間計測した。石の断面積は0.5 mm角の方眼をあてて、枠の数から近似的に求めた。

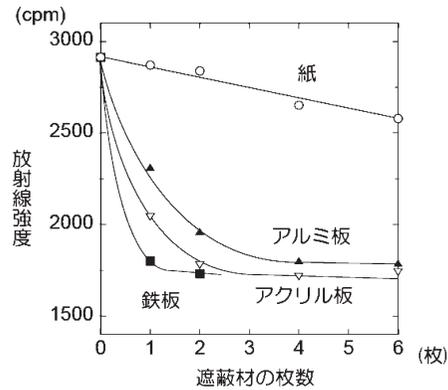


図9. 鉄板による遮蔽効果の検証。ベタフォ石の表面と測定窓との距離を30 mmに保ち、鉄板ありでそれに遮蔽材を追加して1分間2回ずつ計測し、平均値を求めた。

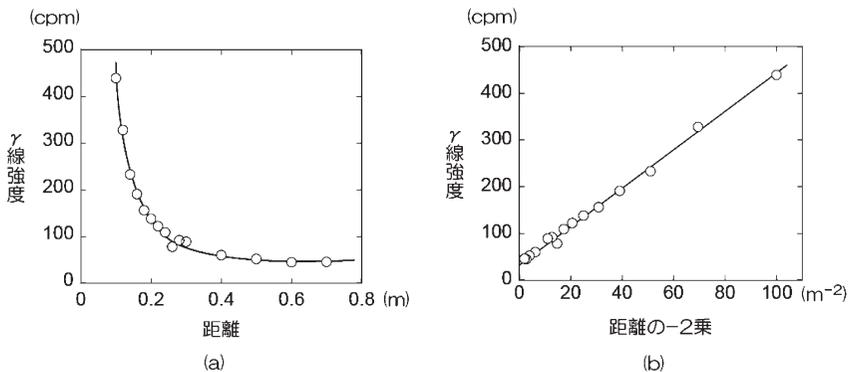


図10. 最も強いベタフォ石からの放射線強度の (a) 距離, および (b) 距離の-2乗に対する変化。鉄板ありで、1分間ずつ強度を測定した。(b) のy切片は、バックグラウンドの高さを意味する。

は机の面から10 cm とし、放射線の強度を鉄板ありで1分間測定した。断面積の測定は、0.5 mm 角の方眼をクリアシートに書き込み、それを石にあてて真上から観察し、枠の数を数えた。0.5×0.5 mm<sup>2</sup>の枠が石で完全にかくれているものを n 個、不完全にかくれているものを m 個とし、断面積を  $S=0.5^2 (n+m/2)$  と近似して求めた。一番強度の強い石は質量も断面積も最大であるが、それを除くと他の石の放射線強度は質量にも断面積に対してもほとんど相関がみられない。石の中を突き抜けて出てくる放射線はかなり弱いと考えられるので、計測される強度は石の表面における放射性元素の放射能で決まるであろう。もし、石の化学組成がどれも同じで均一であれば、断面積が大きいほど、放射線強度も大きくなるはずである。しかし、図 8 (b) からそのような傾向はみられない。このことから、石の表面における放射性元素の分布は不均一であると推定され、大きい石の方が有利ではあるが、小さい石のほうが強度が高いということも起こりうる。

検出窓に鉄板をつけるだけで、 $\beta$ 線が本当に遮断できているかを調べるために、鉄板ありの状態ですらに遮蔽材を追加したときの強度を測定した。強度が一番強いベタフォ石のサンプルを使い、その表面と測定窓との距離を30 mm に固定し、1分間の計測を2回ずつ行った(図 9)。その結果、紙のときでさえ強度が明らかに減衰したことから、鉄板をはめても $\beta$ 線は完全には遮断できていないことがわかった。鉄板を2枚つけて同様な測定を行っても、紙やアルミ板を追加することによって多少は減衰する傾向が残っており、 $\beta$ 線の影響を完全に除去するのは困難といえる。なお、図 9 を見ると、アルミ板でもアクリル板でも鉄板でも、ある一定枚数以上追加しても、放射線強度はほとんど減衰しなくなっている。これは、これらの物質に対して $\gamma$ 線がほとんど減衰せずに透過することを示唆している。

最強のベタフォ石を使って、放射線強度の距離依存性を測定した(図10a)。なるべく $\beta$ 線の影響を除くために、鉄板(1枚)をつけて測定した。距離の-2乗に対して強度をプロットすると、ほぼ直線となることがわかる(図10b)。なお、同じベタフォ石でも強弱の違いがあるため、弱いサンプルを使うと、統計変動の影響を受けて、直線からのプロットのばらつきが大きくなってしまう。

## 4. 考察

### 4-1. バックグラウンド

鉄板ありとなしとで、バックグラウンドの強度を5分間ずつ測定しても、数値にはあまり違いが出ない。これは、大気中の自然放射線の大部分は、ラドンおよびそれが壊変して生じた核種に由来するためである。<sup>7)</sup>つまり鉄板とカウンターの測定窓との間の空間にも空気が存在し、その部分だけでバックグラウンドの大きさが決まっているといえる。

### 4-2. $\alpha$ 線と $\beta$ 線の検出

KCl からの放射線強度は比較的弱いため、統計変動が大きい、遮蔽材としての紙の枚数が

増えるほど、それに伴ってほぼ直線的に強度が減衰した(図6)。それに対して、マントルからの放射線は、近距離(3 cm 以内)における測定において、紙1枚での強度減衰の程度が、2枚3枚と増やしたときに比べて落差が大きかった。紙による $\beta$ 線の減衰の程度は、紙の枚数が少なければ近似的にそれと直線的な相関を示すと考えられる。マントルは霧箱による $\alpha$ 線の観察用線源として利用されていることから、 $\alpha$ 線を発していることは間違いないが、それがガイガーカウンターで検出できたといえる。放射性鉱物の一種であるトール石の $\alpha$ 線スペクトル測定例をみると、 $^{232}\text{Th}$ から始まって $^{216}\text{Po}$ までのトリウム系列の核種から発せられる $\alpha$ 線が、4~6.5 MeVの範囲にピークを形成している。<sup>13)</sup> トリウム系列の $\alpha$ 線のエネルギーは、表2からも4~6 MeV程度であることがわかり、図3から空気中の飛程は3~4.5 cm程度と推定される。これは、図6(a)で、サンプルからの距離が0.5~3.5 cmの範囲で $\alpha$ 線の影響が見られ、4.5 cmでは検出されなくなっていることと良く対応する。

3種類の放射能鉱物標本については、ガイガーカウンターを用いた本実験では $\alpha$ 線を検出できなかった。おそらく、 $\alpha$ 線は岩石のごく表面からしか出てこれないため、 $\beta$ 線よりも相対的に弱くなってしまうと推定される。なお、簡易型の $\alpha$ 線検出器「 $\alpha$ ちゃん」の測定用試料としてもモナズ石が使われているが、その強度は同じ大きさの閃ウラン鉱より弱いとのことである。<sup>14)</sup> 学生実験の際には、むき出しの状態でマントルや放射能鉱物を扱うことは、安全上避けなければならない。サンプルをビニール袋に入れた時点で、 $\alpha$ 線が遮断され検出しにくくなってしまうのは明らかである。しかし、袋に入ったマントルでも、距離9 mmでの測定データを見ると(表8)、遮蔽材として紙を1枚入れたときに比べ、2枚あるいは3枚入れたときにカウント数の落差が少なくなっている。このことから、図6(a)でみられたような $\alpha$ 線の寄与が推定される。いずれにしても、マントルから検出される放射線は $\beta$ 線が主であることは間違いない。

## 5. 学生実験への対応

### 5-1. 実験内容

実験の内容は、次の通りである。自然放射線の強さ(バックグラウンド)を、鉄板(テストプレート)ありとなしで5分間計測する。次に、昆布など身の回りのものの放射線の強さをチェックする。また、昆布の代わりに、KClから出ている放射線のうち $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ のどれが主に計測されているのか、測定操作を工夫して判別する。微量のトリウムを含むマントル(ガスラントラン用)から検出される放射線が、主に $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ のどれかも判別する。放射能鉱物標本の中で強度の一番強いものを選び、 $\gamma$ 線の強さの距離依存性を測定する。サイコロ(100個)を使って、放射性元素壊変のモデル実験も行う。なお、このサイコロ実験のアイデアは、地学で行われている実験テーマを参考にした。<sup>15)</sup>

## 5-2. 実験準備および指導上の注意

放射能鉱物標本はプラスチックの袋および容器に入れて、粉末などが飛び散らないようにする。また、保管場所も通常、人がいるところから遠ざけておく。時間を節約するために、バックグラウンドを、実験室内の数か所で事前に計測しておき、その平均値を実験で使用する。放射線測定器の台数が限られているので、クラス全体を半分に分けて、一方はサイコロを使ったシミュレーションを先にやらせる。

$\gamma$ 線の強さの距離依存性を調べる実験で、強度を距離の二乗の逆数に対してプロットすると、直線になるはずである。ところが、学生からの報告例をみると、右肩上がりの曲線になっているケースがみられた。これはおそらく、放射線源として選んだ鉱物標本の方へ検出器の測定窓を正しく向けていなかったためと思われる。また、プロットが直線にはいるが、y切片が明らかに大きいというケースもみられた。これは、他の放射性鉱物標本がすぐそばに置いてあったため、バックグラウンドが上がってしまった影響である。

## 謝辞

ここで報告した放射線についての実験テーマ開発は、文部科学省「大学教育推進プログラム(平成22年度採択) 科学的思考力を育む文系学生の実験の開発」からの助成金を用いて行われた。

## 参考文献

- (1) 「大宇宙137億年」ニュートン2011年9月号(ニュートンプレス)。
- (2) 「放射線と放射能」(安齋育郎著, ナツメ社, 2007年)。
- (3) 「化学便覧」改訂5版基礎編I(丸善, 2004年) pp.38-63。
- (4) 「放射線入門」第2版(鶴田隆雄著, 通商産業研究社, 2008年)。
- (5) 「理化学辞典」(長倉三郎他編集, 第5版, 岩波書店, 1998年) p.1535。
- (6) 「Q&A 放射線物理」改訂新版(大塚徳勝, 西谷源展著, 共立出版, 2007年)。
- (7) 「身近な放射線の知識」(佐々木康人著, 丸善, 2006年)。
- (8) <http://iss.jaxa.jp/med/research/radiation/>
- (9) 「放射線と現代生活」(Waltar, A. E. 著, 高木直行, 千歳敬子訳, ERC出版, 2006年)。
- (10) “Inspector<sup>+</sup> and Inspector EXP<sup>+</sup> User Manual,” S.E. International (2006)。
- (11) 「五訂増補 日本食品成分表」(食品成分研究調査会編, 医歯薬出版, 2006年), pp.114-117。
- (12) Bea, F. (1996). “Residence of REE, Y, Th and U in granites and crustal protoliths; Implications for the chemistry of crustal melts,” J. Petrology **37**, 521-552。
- (13) 梅本春次「天然における<sup>247</sup>Cmの存在を求めて」岡山大学温泉研究所報告35, 51-56(1964年)。

- 
- (14) Tanabe, H., Takizawa, Y. & Takeuchi, N. (1995). "Development of a portable  $\alpha$ -particle counter for public acceptance activities," J. Radioanal. Nuclear Chem. 197, 57-65.
- (15) 「地学実習帳」(慶應義塾高等学校, 地学教室, 2001年).