

## 中学校理科「放射線」に関する学習・指導のための基礎研究Ⅱ

－簡易放射線測定器「はかるくん」を活用した測定例－

内田由美子\*・松永 武\*\*・西山 桂\*\*\*・重松 宏武

A Fundamental Study for Learning and Teaching about “Radiation”  
in Science Classes of Junior High Schools II:  
the measurement example using a simple radioactivity measuring device “Hakaru-kun”

UCHITA Yumiko, MATSUNAGA Takeshi, NISHIYAMA Katsura, SHIGEMATSU Hirotake  
(Received January 10, 2012)

キーワード：放射線教育、簡易放射線測定器「はかるくん」、中学校理科、新学習指導要領

### はじめに

平成24年度から本格的に実施される中学校理科新学習指導要領<sup>1)</sup>(以下、新学習指導要領という)に「放射線」が加わる。そのため、中学校理科での「放射線」学習に向けてこれまで多くの教材や指導カリキュラム等が公開・紹介されてきた。これらの内容は、生徒向けの教材を提示することに重点が置かれているため、指導者が知りたいような一歩踏み込んだ知識を得ることは難しい。そこで我々は、中学校理科教員または教員を目指す大学生向けに「放射線」学習指導のために必要な基礎知識を要約し、報告を行なった<sup>2)</sup>。具体的には、簡易放射線測定器「はかるくん」の活用を柱として、1：「はかるくん」が測定している放射線、2：空間的測定分布、3：測定値と信頼度の関係、それぞれについて定量的かつ具体的に紹介した内容となっている。本論文では、この続編として、引用文献2内で提案しつつも未報告の内容(引用文献2の表2中の項目③)について紹介する。具体的には、「はかるくん特性セット」を使った測定実験として、第1章に放射性物質から出る放射線の正体について、第2章に放射線防護に関する『距離』と『遮蔽』実験について示す。

### 1. はかるくん特性セットを使った測定実験－放射性物質から発せられる放射線の正体－

先に述べた「はかるくん特性実験セット」(以下、単に「特性セット」という)とは、「はかるくん」を用いて室内で測定実験を行うためのキットであり、“実験①：測定試料の放射線測定、実験②：放射性物質と測定器の『距離』関係を調べる実験、実験③：放射性物質と測定器間の『遮蔽物』の影響を調べる実験”の3つを行なうことが可能である<sup>3)</sup>。本章ではこれらのうち、実験①について述べる。

“実験①：測定試料の放射線測定”とは、「特性セット」に含まれている測定試料(花崗岩、湯の花、船底塗料、カリ肥料、塩の5種類)の放射線量を測定してバックグラウンドとの差を比較する実験である。それぞれの試料は花崗岩を除き、直径4.0cm、高さ7.5cmの円筒形プラスチック容器に粉末状となって入っている。この実験を通して中学生は身の回りにある物質から放射線が出ていることを学習する。また発展的にこれらの物質中に放射性核種が含まれており、これらの原子から放射線が発生するという知識を得る。参考値として我々が「はかるくんDX-300」を測定試料に密着させた状態で測定した値及び測定試料に含まれる放射性核種を表1に示す。なお、ある程度放射線強度を持つことが予想された物質の測定であるため、比較的時間を必要としない引用文献2で紹介した『10秒モデル』6回測定を採用した。以下、特に示さない場合は、この測定方法を採用したこととする。

\*山口大学大学院教育学研究科 \*\*山口大学教育学部附属山口中学校 \*\*\*島根大学教育学部

表1 はかるくん特性セットに入っている測定試料の放射線量と含まれている放射性核種及び崩壊系列。  
 なお、バックグラウンドは0.068  $\mu$ S/hである。

測定試料	測定値 ( $\mu$ S/h)	放射性核種及び崩壊系列
花崗岩	0.115	$^{40}\text{K}$ 、トリウム系列、 ウラン系列
湯の花	0.175	トリウム系列、ウラン系列
船底塗料	2.283	トリウム系列
カリ肥料	0.084	$^{40}\text{K}$
塩	0.078	$^{40}\text{K}$

表1からは全ての試料から放射線が出ており、各物質の測定値は大きい方から順に船底塗料>>湯の花>花崗岩>カリ肥料>塩となっていることが分かる。質量や形状を無視しているため、この結果について定量的評価はできないものの、中学生が知るべき学習内容を十分満たしている。ここで指導者としては、この内容に関するさらなる情報として、“表1に示した放射性核種からどのような崩壊によって $\gamma$ 線が放出され、「はかるくん」が測定するものは何か”についての知識を得る必要がある。ここでは例として、 $^{40}\text{K}$ について紹介する。 $^{40}\text{K}$ は同位体組成比0.0117%で存在するカリウムの放射性同位体であり(表2)、半減期12.48億年で図1に示す過程を経て安定同位体である $^{40}\text{Ar}$ と $^{40}\text{Ca}$ に変化する。つまり「はかるくん」は $^{40}\text{K}$ が崩壊によって $^{40}\text{Ar}$ に変わる過程で放出される $\gamma$ 線を観測しているのである。同様にトリウム系列やウラン系列に属する放射性核種からも、それぞれ固有の崩壊によって $\gamma$ 線が放出される<sup>4,5)</sup>。

表2 カリウムの同位体組成比<sup>4)</sup>

同位体	存在比(%)
$^{39}\text{K}$ (安定)	93.26
$^{40}\text{K}$ (放射性)	0.0117
$^{41}\text{K}$ (安定)	6.73

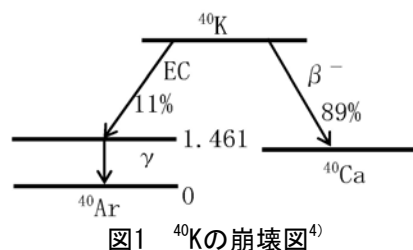


図1  $^{40}\text{K}$ の崩壊図<sup>4)</sup>

もう一步踏み込むと、“そもそも測定試料の化学組成はどのようになっているか(その物質中の放射性核種の割合はどれくらいか)”ということを明らかにすることも大切と考える。しかし残念ながら、測定試料の組成は天然物においては産地、人工物においては製造者や個々の商品に大きく起因するため、これらがはっきりしない測定試料に関する情報を示すことはできない。そこで参考として、ケニス株式会社の「放射能鉱物標本9種(T-9)」の鉱物について調べてまとめた結果を付録1に示す。ここでは産地を同定することができた北投石に関しては、その産地から得られる化学組成を、その他の鉱物については標準的な化学組成を示した。

## 2. はかるくん特性セットを使った測定実験 -放射線防護に関する『距離』と『遮蔽』実験-

放射線の特徴を理解することと同時に、「防災」という観点からも放射線について学習する必要がある。放射線から身を守る方法は、「放射線防護の三原則」として以下のように表される<sup>6)</sup>。

1. 『時間』：被ばく時間を短くする。線量[ $\mu$ Sv]= その場所の線量率[ $\mu$ Sv/h]×滞在時間
2. 『距離』：放射線源から離れる。線量率[ $\mu$ Sv/h]= (距離)<sup>2</sup>に反比例
3. 『遮蔽』：放射線源との間に遮蔽物を置く。

また、これらの変化は一般的に図2に示した概念図で表される。図2において、項目1『時間』については、被ばく量が単純に時間に比例して増加するため、時間を短くすることが被ばく量を軽減することになるという意味であり、理解しやすい。しかし、項目2『距離』についての関係式は、なぜ距離の2乗に反比例するのか、また、項目3『遮蔽』については、項目2『距離』の減衰の仕方と類似しているが、なぜ関係式が与えられていないのか、という疑問が生じる。特性セットでは、これら放射線防護に関して、“実験②：放射性物質と測定器の『距離』関係を調べる実験、実験③：放射性物質と測定器間の『遮蔽物』の影響を調べる実験”ができるようになっている。本章では放射線防護における『距離』(2-1小節)と『遮蔽』(2-2小節)に

関してそれぞれ特性セットを用いた実験及び定量化した実験の結果と考察を示す。

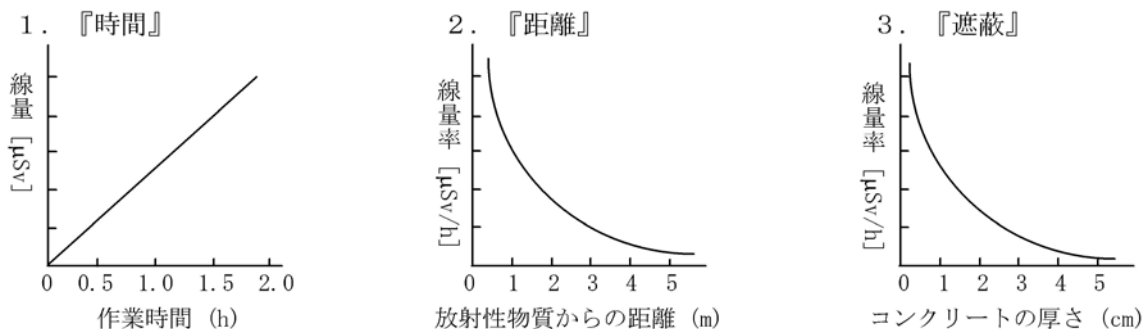


図2 「放射線防護の三原則」の定性的な概念図

### 2-1 放射線防護に関する『距離』実験

初めに、先に述べた放射線強度が距離の2乗に反比例することについて簡単にまとめる。放射性物質と測定器の『距離』関係において採用されている関数は『逆二乗の法則』と言われ、万有引力の法則等の様々な物理法則に採用されているものである。これは「物理量の定量的な値が発生源からの距離の2乗に反比例する」ということを意味し、その概念図を図3に示す。源Sから放射される流束を矢印が表しており、この流束線の数の合計は距離に対して一定であり、流束線の密度が大きいことは強い場(ここでは強い放射線量)であることを意味している。球面の面積が半径の2乗に比例して増加していることより、流束の密度は源Sからの距離の2乗に反比例する(単純には、図中 $r$ の位置では単位面積あたり9本の流束が、 $3r$ では1本の流束となる)。ゆえに源Sから距離の2乗に反比例して放射線強度は下がることとなる。

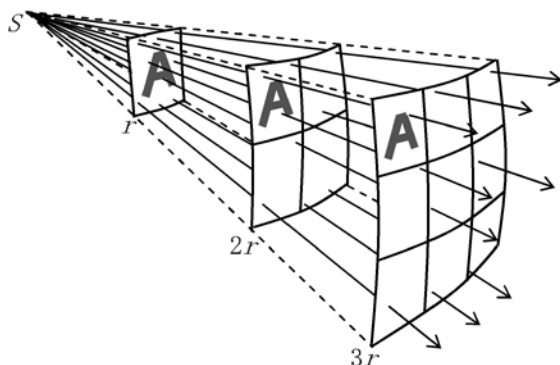


図3 「逆二乗の法則」を表す概念図。距離 $r$ の位置では単位面積あたりの流束数が9本であるが $3r$ の位置では距離の2乗に反比例して1本となる。

前節で上げた疑問「なぜ放射線量は距離の二乗に反比例するのか」は、この原理(逆二乗の法則)により説明できる。次に、特性セットと同じデータ数を用いた試行実験の結果を図4に示す。実験方法は放射線強度の強い船底塗料(表1)を用いて $5\text{cm} \cdot 10\text{cm} \cdot 15\text{cm} \cdot 20\text{cm}$ の4点の放射線量を測定するというものであり、ここで距離は船底塗料(直径 $4.0\text{cm}$ )の中心から「はかるくん」の+印までの距離を意味している。

図4のデータ4点の結果は、直線関係ではなく下に凸の減少を示しており、距離の二乗に反比例するということを定性的に理解することのできる結果を簡単に得ることができ、関係式<sup>7)</sup>

$$I = \frac{I_0}{r^2} \quad (1)$$

に従った最小二乗法によって最適化した結果(破線)ともよく一致する。因みに $I_0=18.725$ という値を得た。このように得られた結果は中学生が行う実験としては申し分無いものであるが、指導者側の理解度向上を目指すためには以下の2点を考慮して再検討する必要があると考えた。

- 課題①. 『逆二乗の法則』は源Sが質点の場合に成立するが、今回用いた船底塗料は直径 $4.0\text{cm}$ 、長さ $7.5\text{cm}$ の容器に粉末として充填されており、むしろ剛体と考えるべきである。その違いをどう説明するか。
- 課題②. 測定数4点では局所的なデータしか測定できず、全体の減衰を観測していないのではないか。

これらの2つの課題を解決するために行った検討の結果を以下にそれぞれ示す。

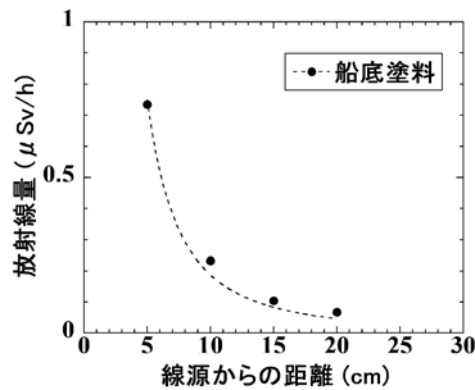


図4 特性セットを用いた距離による放射線量の減衰の様子。線源は船底塗料を用いており、破線は式(1)により最適化されたものである。

○課題①の検討

質点と剛体の違いを確認するために、船底塗料に比べてはるかに小さく、質点と仮定できる方トリウム石(表3)を用いて船底塗料との比較を行ない、同時に(1)式に代わる関数の検討を行なうこととした。(1)式は源Sが質点の場合に成立する関係式であり、これを剛体に適応させるためには、放射線が剛体のあらゆる点(質点)から放出されていると考える必要がある。剛体の各点からの距離を変数 $a_i$ を用いて表すと、 $r+a_i (r \gg |a_i|)$ となるが、この積算値を正確に求めることは困難であり、ここではあらゆる点から観測される放射線量の減衰を丸めた近似解として以下の式を採用することとした<sup>8)</sup>。ここで $a$ は定性的に剛体の広がりを表す指標であり、質点に近いほど小さい値をとると考えてよい。

$$I = \frac{I_0}{(r+a)^2} \quad (2)$$

表3 用いた線源の特性

試料名	船底塗料	方トリウム石
形状	円柱(直径 4.0 cm、高さ 7.5 cm)、粉末	擬楕円形(最大長0.897 cm、最短長0.471 cm)、固体
質量	113.7 g(容器含む)	1.0029 g
放射性物質	Th( <sup>232</sup> Th 100%)	Th( <sup>232</sup> Th 100%)

この関係式と線源の形状の両方について考察するために求めた結果を図5及び表4に示す。図5において破線は数式(1)、実線は数式(2)に従った減衰曲線である。第一に、関係式については当然の事ながら(2)式を用いた方が測定値からのずれの小さい近似曲線となっていることが分かる。次に、線源の形状について表4に示した $a$ の値を比較すると、本来質点に近い方トリウム石の方が大きな値を得ている。これは、両線源において線源からの距離が近い部分のデータを観測していないことが原因であり、課題②の検討により、改めて考察することとする。課題①については、中学生が特性セット通りの実験をする場合、線源の形状を考慮することなく、(1)式を用いた減衰曲線を求めるだけで十分な結果を得ることができる。

○課題②の検討

課題①の検討から、測定点の数はグラフの形状にとって重要な要素であることが分かった。そのため、測

表4 船底塗料と方トリウム石の放射線量の減衰を表す関数(図5)

採用した関数	船底塗料		方トリウム石	
	$I_0$	$a$	$I_0$	$a$
(1)式	18.725	-	6.7067	-
(2)式	29.532	1.3418	11.205	1.536

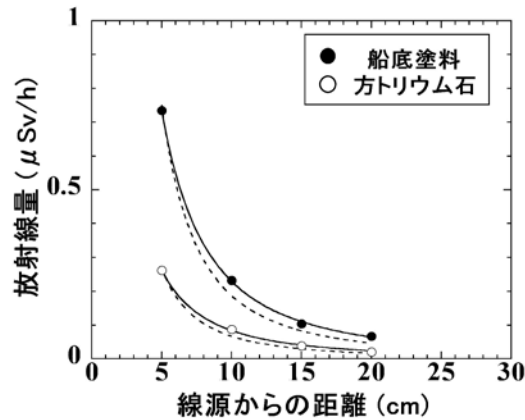


図5 船底塗料と方トリウム石の距離による放射線量の減衰の様子。  
 なお、破線は数式(1)を実線は数式(2)を最適化させた結果である。

定範囲と測定点を増やし、(1)、(2)式を用いて最適化した結果を図6及び表5に示す。図6から、両線源とも約35cmを超えると放射線量がバックグラウンドとほぼ等しくなる様子を読み取ることができ、データ数の少ない図5は局所的な減衰しか観測していないことが確認された。やはり、減衰の様子を定量的に観測するためには測定範囲を広くする(図5においては5cm以下及び20cm以上)必要があるといえる。なお、関係式については図5と同様、(2)式を用いた方がより測定値からのずれの小さい近似曲線となった。さらに、(2)式を用いた最適化により得られた $a$ の値についても方トリウム石の値が小さく、正当な評価がされたといえる。

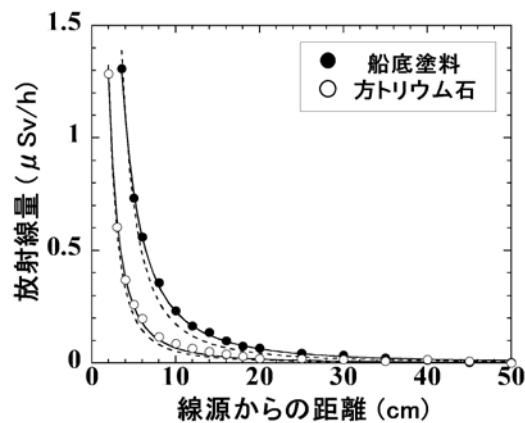


図6 船底塗料と方トリウム石の距離による放射線量の減衰の様子。図4、図5よりも測定点が多い。

表5 船底塗料と方トリウム石の放射線量の減衰を表す関数(図6)

採用した関数	船底塗料		方トリウム石	
	$I_0$	$a$	$I_0$	$a$
(1)式	17.475	-	5.2867	-
(2)式	28.514	1.1331	7.3439	0.39982

本小節では課題①及び②の考察を通じて、関係式と測定数に関して検討を行った。どちらに関しても、優位な差が観測されたが、大きく改善を求めるほどの顕著な差ではない。中学校の教育現場においては図4で示した測定その他、測定点を数点増やし、従来の基本的な関係式((1)式)を用いた議論を行なうことで十分と考える。

## 2-2 放射線防護に関する『遮蔽』実験

『遮蔽』による放射線量の変化は『距離』の場合と同様に下に凸の減衰曲線で表されることは一般的に知られているが、その関係式は広くは知られていない(図2)。本小節では特性セットを用いた『遮蔽』実験を基に、遮蔽による放射線量の減衰について考察する。まずは、特性セットの使い方(ワークシート)<sup>3)</sup>に従った測定方法による結果を図7に示す。この測定方法は、船底塗料の中心から5cmの位置に「はかるくん」を置き、アクリル・アルミニウム・ステンレス・鉛の4種類の遮蔽板(それぞれ厚さ0、0.5、1.0cm)の放射線量を四方から測定するというものである(図7右)。測定値は、特性セットの使い方に提案されている10秒ごとに3回測定した値の平均値を用いた。この実験から中学生は、遮蔽によって放射線量が減衰すること及び減衰の仕方は遮蔽板の種類によって異なることを定性的に学習することとなっている。

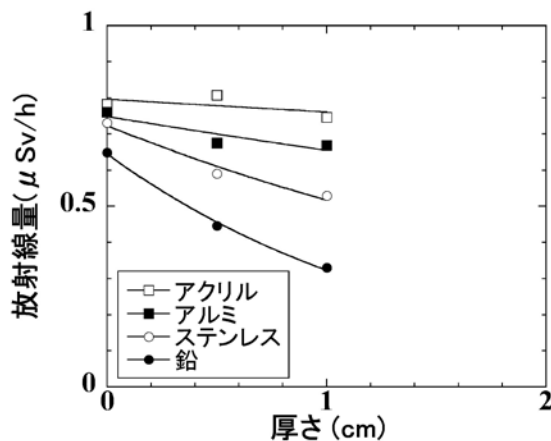


図7 はかるくん特性実験セットの遮蔽実験結果(左)と実験の様子(右)

図7左図からは、遮蔽効果がアクリル<アルミニウム<ステンレス<鉛の順に大きいことが見て取れる。この結果は、先に述べた中学生にとっての最低限の学習内容は満たしているが、グラフの形状及び関係式について理解するためには問題が残る。特にグラフの形状については、直線的に減衰しているように読み取れ、図2に示した概略図とも異なっている。これは、測定点が少なく、減衰の立ち下りのみを測定したためと予想される。また、図7右図のように4台の「はかるくん」を用いて異なる遮蔽板に対して測定を行っているため、厚さ0cmの位置での放射線量が一致しない点も改善すべきである。この結果を踏まえて、指導者側の理解度向上を目指すために、以下2点の課題を挙げる。

課題①. 『遮蔽』による放射線量の減衰についての関係式を理解すること。

課題②. 遮蔽板の厚さを増加させ、局所的ではなく、定量的に減衰全体の様子を観察、理解すること。

これら2つの課題を解決するために行った検討の結果を2-2-1小節及び2-2-2小節にそれぞれ示す。また、特性セットの内容から少し外れるが、より『遮蔽』実験の理解を深めるために、鉛遮蔽に限定して異種線源間の比較を行った実験の結果を2-2-3小節に示す。

### 2-2-1 『遮蔽』による放射線量の減衰を表す関係式

比較的体積の小さい放射線源から出た $\gamma$ 線が吸収係数 $\mu$ を持つ物質を透過することを考えると、強度の変化 $dI (< 0)$ は、厚さ $x$ における強度 $I$ と新たに透過する距離 $dx$ に比例すると考えられ、以下のように示される<sup>9)</sup>。

$$-dI = \mu I dx \quad (3)$$

ここで $\mu$ は線減衰係数あるいは単に減衰係数と呼ばれ、遮蔽板の種類と入射する $\gamma$ 線のエネルギーに起因する係数である(ここでは減衰係数と呼ぶことにする)。この(3)式を積分することにより、

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4)$$

という関係式を得る。『距離』による関係式((1)、(2)式)は距離 $r=0$ で発散するが、『遮蔽』に関する関係式((4)式)は遮蔽の厚さ $x=0$ の時、有限の値 $I_0$ をとり、指数関数的な減衰となる。これが図2右図の正体である。また、例えば、エネルギー1MeVの $\gamma$ 線の鉛の減衰係数が $\mu = 0.75 \text{ cm}^{-1}$ であるとする、この強度を1000分の1まで減衰するまでに必要な厚さは(4)式より、

$$\frac{I}{I_0} = e^{-0.75x} = 10^{-3} \quad (5)$$

と表され、 $x=9.21\text{cm}$ を得る。つまり、厚さ9cm強の鉛が必要である。ここで問題は、線源から放出される $\gamma$ 線のエネルギーが一つであれば減衰係数 $\mu$ を求めることが可能であるが、多くの線源が様々なエネルギーの $\gamma$ 線を同時に放出するため、区別できないという点である。この点については、2-2-3小節で改めて検討を行なうが、減衰係数 $\mu$ について定量的考察を必要としないのであれば、線源に対してそれぞれ個別の減衰係数 $\mu$ をもつ(4)式で表されると考えてよい。この関係式からは、グラフの形状が下に凸の減衰を示すことは予想できるが、それ以上の定量化は困難といえる。

さらに、『遮蔽』に関しても『距離』同様に減衰に対して重要な概念がある。それは透過した $\gamma$ 線の強度 $I$ に対して入射する放射線の強度 $I_0$ の減衰は図3において流束線の一部が遮蔽物を透過することが出来ずに数が減ったことを意味しており、放射線そのものが持つエネルギーに変化は無いという点である(図8)。

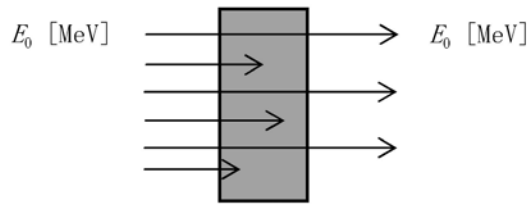


図8  $\gamma$ 線の減衰を表す概略図。遮蔽物通過前後の放射線が持つエネルギー $E_0$ [MeV]は変わらない。

### 2-2-2 遮蔽板の厚さに対する詳細な変化(遮蔽板の種類が異なる場合)

放射線の『遮蔽』についての関係式は(4)式で表され、指数関数的に減衰することが明らかとなった。このことを踏まえ、図7の補足として船底塗料と「はかるくん」の距離を10cmに広げ、遮蔽板の厚さ約5cmまで測定した結果を図9に示す。因みに、図7の改善点として測定器の違いによる誤差を避けるために1台の「はかるくん」を用い、さらに精度よく求めるために10秒ごとに12回測定した値の平均値を求めた。厚みを増やすことにより、鉛とステンレスにおいては十分な減衰効果が確認されたが、アクリルとアルミにおいては厚さ5cmにおいても減衰効果が小さく、直線的な変化を示した。ここで、あえて(4)式を用いて最小二乗法による最適化を試みた結果を表6に示す。それは減衰係数について定量的な議論はできないにせよ、平均的な減衰係数が求まると考えたからである。なおここでは、 $I_0=0.28$ の固定値を採用した。

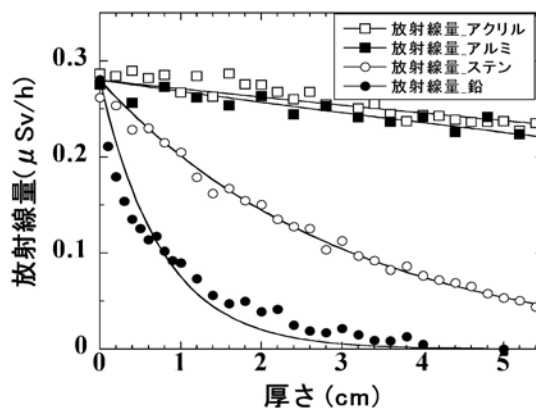


図9 遮蔽実験の結果(遮蔽板による減衰曲線の違い)。船底試料と「はかるくん」の距離が遠ざかった分、厚さ0cmにおける放射線量が図7の結果に比べて減少している。鉛に関しては $I_0$ を固定したことにより、実測との差が大きくなっている。このことは2-2-3小節にて補足説明を行なう。

表6 最小二乗法により求められた $\mu$ の値(図9)

遮蔽板	アクリル	アルミニウム	ステンレス	鉛
$\mu$	0.0327	0.0431	0.3294	1.3101

以上のように測定点をふやすことで、視覚的にも数値的にもアクリル<アルミニウム<ステンレス<鉛の順に遮蔽効果が高くなることが改めて確認された。なお、減衰係数 $\mu$ は入射する $\gamma$ 線のエネルギーに依存するが、一般的に遮蔽板の密度の高い物質の方が数値が高いと言われている。遮蔽板に用いた材質の密度はそれぞれ、アクリル ( $1.191 \text{ g/cm}^3$ ) <アルミニウム ( $2.6989 \text{ g/cm}^3$ ) <ステンレス ( $7.91 \text{ g/cm}^3$ ) <鉛 ( $11.35 \text{ g/cm}^3$ ) であることから、一般論と整合する結果を得ることができた。本小節では、『遮蔽』実験は比較的簡単な原理・原則の基成り立っており、測定範囲と測定点を増やすことによりある程度定量的考察ができることを示した。学校現場においても是非、遮蔽板を厚くして、指数関数的な減衰の様子を観測し、理解してほしい。

### 2-2-3 遮蔽板の厚さに対する詳細な変化(異なる線源を用いた場合)

前小節においては遮蔽板の厚さの測定点を増やすことにより、遮蔽板の種類によって減衰曲線 $\mu$ が異なることが示された。ここではさらに船底塗料、方トリウム石、燐灰ウラン鉱の3つの線源を用いて、同一遮蔽板に対する異種線源の『遮蔽』効果について検討を行なう。船底塗料と方トリウム石は表3に示した試料を採用し、新たに示した燐灰ウラン鉱は岡山県鏡野町(旧上斎原村)人形峠で産出された擬楕円形(最大長約5.0cm、最短長約2.0cm)、質量38.3gのものを用いた。遮蔽板は遮蔽効果の高い鉛を採用し、この遮蔽板の厚さと放射線量の関係を図10、(4)式を最適化することにより得られた減衰係数 $\mu$ を表7にそれぞれ示す。

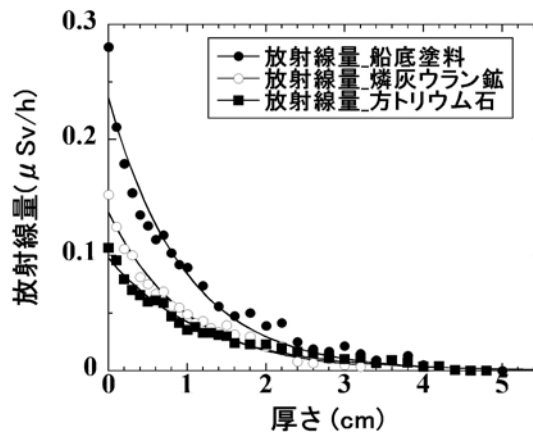


図10 遮蔽板の厚さと放射線量の関係(線源による減衰曲線の違い)。船底塗料のデータは図9と同じである。

表7 (4)式に従い最適化された個々の遮蔽板に対する入射強度と吸収係数(図10)。

因みに船底塗料において、 $I_0=0.28$ に固定した場合の $\mu$ は1.3101(表6)であった。

線源	船底塗料	方トリウム	燐灰ウラン鉱
$I_0$	0.2363	0.09763	0.1374
$\mu$ (実測値) [ $\text{cm}^{-1}$ ]	1.0369	0.08348	1.0277

図10の船底塗料のデータから、遮蔽板無し( $x=0$ )の放射線量と0.1cmの遮蔽板を入れた時( $x=0.1$ )の放射線量の減衰変化が著しく大きいことが見て取れる。表現を変えると、 $x=0$ における放射線量のデータとそれ以外のデータとが同一曲線で表されていないように見える。このことが影響し、厚さ0cmでの値 $I_0$ を固定した場合と変動させた場合に個別に偏った最適化がなされ、減衰係数に大きな差が生じている(1.3101と1.0369)。この3割弱の差がこの測定自体の精度(あまり良くない)を表しており、この点を考慮しながら考察を行なう。船底塗料と方トリウム石に存在するトリウム系列及び、燐灰ウラン鉱に存在するウラン系列の放射性核種について、出発物質( $^{232}\text{Th}$ と $^{238}\text{U}$ )と $\gamma$ 線を強く放出する核種に関する情報を表8に示す。

$^{232}\text{Th}$ と $^{238}\text{U}$ から出る $\gamma$ 線のエネルギーは、それぞれ0.059MeV、0.050MeVであり、減衰係数 $\mu$ の理論値は $60.416\text{cm}^{-1}$ 、 $91.265\text{cm}^{-1}$ という大きな値を持つ。もし、それぞれこれらのエネルギーの $\gamma$ 線が単一で放出していると仮定すると、(4)式により、わずか0.1cmで強度が400分の1以下に減衰することになるが、実際図10の減衰曲線は、0.1cmでは10分の9程度までしか減衰しない。これは表8に示した放射性核種を始め、それぞれの系列に属する放射性核種の崩壊が恒常的に行われており、これらを積算した値として減衰係数 $\mu$ が求め



表8 各放射性核種のエネルギー、質量減衰係数、減衰係数の値<sup>10-12)</sup>

崩壊系列	放射性核種	$\gamma$ 線のエネルギー (MeV)と放出割合	質量減衰係数 $\mu / \rho$ [ $\text{cm}^2/\text{g}$ ]	減衰係数 $\mu$ [ $\text{cm}^{-1}$ ]
トリウム系列	$^{232}\text{Th}$	0.059	5.323	60.416
		0.301 0.239	0.403 0.760	4.574 8.630
	$^{208}\text{Tl}$	2.615	0.044	0.499
		0.860	0.083	0.947
		0.583	0.131	1.487
		0.511	0.157	1.786
ウラン系列	$^{238}\text{U}$	0.050	8.041	91.265
		0.352 0.295	0.318 0.433	3.606 4.913
	$^{214}\text{Bi}$	1.764	0.049	0.056
		1.120	0.065	0.739
		0.609	0.123	1.398

られたためである(表7)。より詳細を知るためには、半導体検出器等を用いてエネルギー分散から個々の放射線を特定させなければならず、残念ながら「はかるくん」では調べることができない。本論文は中学校理科での「放射線」学習を基本としており、エネルギー分散については内容を逸脱しているために、ここではこれ以上議論しないこととするが、『減衰』は様々な要因により構成されていることを理解して欲しい。

## おわりに

本論文は前論文<sup>2)</sup>の「放射線の基礎編」に対する「応用編」であり、「はかるくん特性実験セット」の活用に関して少し踏み込んだ内容となっている。「放射線」は本来、身近なものであるが、直接五感で感じ取れないため、中学生にとっては簡単なイメージで考えることの難しい内容であると考え。ここでは、放射線防護の三原則のうちの『距離』と『遮蔽』に注目し、定量的理解の向上を目的とした議論を行なった。測定実験に重点を置いた内容であったが、学べば学ぶ程、基礎が重要であり、放射線核種やその崩壊過程を理解することが大切であることを知ることとなった。世間が放射線教育の重要性を理解し始めている現状を踏まえ、中学校理科指導者側(特に教員を目指す大学生)のより一層の基礎知識力の向上に向けた自己努力を期待したい。

本論文で述べた活動の一部は(財)日本教育公務員弘済会及び(財)山口大学教育研究後援財団からの研究・事業助成により行った。ここに感謝申し上げます。さらに、実験に協力頂いた山口大学教育学部の棟居翼氏、前川真利奈氏に感謝申し上げます。

## 引用文献

- 1) 文部科学省：『中学校学習指導要領解説 理科編(平成20年9月)』，大日本図書株式会社，2008.
- 2) 内田由美子，重松宏武：「中学校理科「放射線」に関する学習・指導のための基礎研究I」，山口大学教育学部附属教育実践総合センター研究紀要，33，2012. 投稿中
- 3) 日本科学技術振興財団：「はかるくんweb」 <http://hakarukun.go.jp/>
- 4) 海老原熊雄：『改訂第3版 アイソトープ便覧』，丸善株式会社，1984.
- 5) 国立天文台：『理科年表』，丸善株式会社，2011.
- 6) 高度情報科学技術研究機構：「原子力百科事典ATOMICA」 <http://www.rist.or.jp/atomica/>
- 7) 社団法人日本アイソトープ協会：『アイソトープの安全取扱入門-教育訓練テキスト-』，丸善，1996.
- 8) 河野孝央：「化学肥料を材料に製作した教育用ディスク状線源」，RADIOISOTOPES，57，703-708，2008.
- 9) 飯田博美：『放射性概論』，通商産業研究社，2001.
- 10) 放射線医学総合研究所：『放射線の線源と影響(1977年国連科学委員会報告書)上巻』，

アイ・エス・ユー株式会社, 1978.

- 11) 日刊工業新聞社: 「トリウム系列より放出される $\gamma$ 線」, 原子力工業, 17, 73-74, 1971.  
 12) U.S. Department of Commerce: 「The National Institute of Standards and Technology (NIST)」,  
<http://www.nist.gov/index.html>

付録1 放射能鉱物標本9種それぞれに含まれる放射性元素とその割合<sup>a) ~c)</sup>。化学組成に  
 おいて北投石は産地のものを、その他は標準的なものを示す。

No.	鉱物名 [産地]	化学式	分子量	化学組成	放射性元素
1	燐灰ウラン石 <i>Autunite</i> [岡山県鏡野町(旧上斎原村) 人形峠]	$\text{Ca}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10\text{--}12\text{H}_2\text{O}$	986.26	5.69 % CaO 54.76 % $\text{UO}_2$ 14.39 % $\text{P}_2\text{O}_5$ 21.92 % $\text{H}_2\text{O}$	U Ca
2	コロンブ石 <i>Columbite</i> [Arasuai Minas Gerais Brazil]	$(\text{Fe}, \text{Mn})(\text{Nb}, \text{Ta})_2\text{O}_6$	394.81	33.58 % $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 2.02 % $\text{TiO}_2$ 8.98 % MnO 47.13 % $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 9.10 % FeO	Ta
3	サマルスキー石 <i>Samaruskite</i> [Tsaramanga, Antsirabe, Madagascar]	$(\text{YFe}^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{U}, \text{Th}, \text{Ca}) (\text{Nb}, \text{Ta})\text{O}_4$	299.85	16.81 % (La, Ce, Pr, Nd, Sm) $_2\text{O}_3$ 7.53 % $\text{Y}_2\text{O}_3$ 18.01 % $\text{UO}_2$ 14.74 % $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 35.46 % $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 7.99 % $\text{Fe}_2\text{O}_3$	La Ce Nd Sm U Ta
4	コフィン石 <i>Coffinite</i> [Ambrosia Lake area, Grants Valencia Co, New Mexico]	$\text{U}^{4+}[(\text{Si}, \text{Hf})\text{O}_4]$ $\text{U}(\text{SiO}_4)_{1-x}(\text{OH})_{4x}$	327.71	82.40 % $\text{UO}_2$ 16.50 % $\text{SiO}_2$ 1.10 % $\text{H}_2\text{O}$	U
5	閃ウラン鉱 <i>Uraninite</i> [Svornost Mine, Bohemia Czech]	$\text{UO}_2$	270.03	100.00 % $\text{UO}_2$	U
6	ウランマイクロ石 (ウランパイクロア) <i>Uranmicrolite</i> [Jefferson Co, Colorado]	$(\text{UCaCe})_2(\text{NbTa})_2\text{O}_6(\text{OHF})$	695.81	9.67 % CaO 31.05 % $\text{UO}_2$ 57.16 % $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 3.82 % $\text{Nb}_2\text{O}_5$ 1.29 % $\text{H}_2\text{O}$	U Ta H
7	褐レン石 <i>Allanite</i> [福島県伊達郡川俣町飯坂]	$(\text{Ca}, \text{Ce})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+})_3[\text{OH} \text{SiO}_4 \text{Si}_2\text{O}_7]$ $(\text{Ce}, \text{Ca}, \text{Y})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$	614.71	5.47 % CaO 32.04 % $\text{Ce}_2\text{O}_3$ 5.51 % $\text{Y}_2\text{O}_3$ 18.66 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ 9.74 % $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 29.32 % $\text{SiO}_2$ 1.47 % $\text{H}_2\text{O}$	Ce Y 微量元素 として U Th H
8	燐銅ウラン鉱 <i>Torbernite</i> [Rosarito Mine, Sonora, Mexico]	$\text{Cu}(\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{--}12\text{H}_2\text{O}$	991.71	54.46 % $\text{UO}_2$ 8.02 % CuO 14.31 % $\text{P}_2\text{O}_5$ 19.98 % $\text{H}_2\text{O}$	U
9	北投石 <i>Hokutolite</i> [秋田県仙北群田沢湖町玉 川温泉]	$(\text{Ba}, \text{Pb})\text{SO}_4$	247.36	31.45 % $\text{SO}_3$ 15.17 % PbO 48.14 % BaO 0.04 % CaO 0.37 % $\text{Al}_2\text{O}_3$ 0.14 % $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 0.20 % MgO 2.65 % $\text{SiO}_2$	微量元素 として U Th 希土類金属 La Ce 等

a) 牧野和孝: 『カラー版鉱物資源百科辞典』, 日刊工業新聞社, 1999.

b) 堀内公子: 「北投石 - 温泉で生成する放射性鉱物」, 放射線教育, 8, 39-48, 2004.

c) David Barthelmy: 「Mineralogy Database」 <http://webmineral.com/>