

Title	シンチレーションカウンターを用いた α と β 線の同時強度測定実験
Sub Title	An experiment on simultaneous measurement of α - and β -rays by using scintillation counter
Author	大場, 茂(Oba, Shigeru) 向井, 知大(Mukai, Tomohiro)
Publisher	慶應義塾大学日吉紀要刊行委員会
Publication year	2013
Jtitle	慶應義塾大学日吉紀要. 自然科学 (The Hiyoshi review of the natural science). No.53 (2013. 3) ,p.45- 59
JaLC DOI	
Abstract	慶應義塾大学日吉キャンパスにおける文系学生を対象とした化学実験のテーマの1つとして、自然放射線と放射能鉱物に関する実験を2011年度から行っている。この実験では、ガイガーカウンターを使って、KCIなどのサンプルから検出される放射線は、 α , β , γ 線のうちどれが主であるかを、遮へい材による減衰の程度から判別している。この方法は簡便ではあるが間接的であるため、 α 線の強度が弱いにしても本当に検出できているのかわからない。そこで、 α と β 線を同時にしかも区別して検出できるシンチレーションサーベイメータ(以降、サーベイメータと呼ぶ)を導入し、それぞれに対する遮へい材の効果を調べた。放射能鉱物が近くにあると、サーベイメータの検出窓をアルミ板で遮へいしても、 β の計測数が見掛け上かなり増えることが確認された。これはプラスチックシンチレータで、 β 線だけでなく γ 線も検出されるためである。
Notes	研究ノート
Genre	Departmental Bulletin Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=AN10079809-20130331-0045

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.

シンチレーションカウンターを用いた α と β 線の同時強度測定実験

大場 茂・向井知大

An Experiment on Simultaneous Measurement of α - and β -rays by Using
Scintillation Counter

Shigeru OHBA and Tomohiro MUKAI

概要

慶應義塾大学日吉キャンパスにおける文系学生を対象とした化学実験のテーマの1つとして、自然放射線と放射能鉱物に関する実験を2011年度から行っている。この実験では、ガイガーカウンターを使って、KClなどのサンプルから検出される放射線は、 α 、 β 、 γ 線のうちどれが主であるかを、遮へい材による減衰の程度から判別している。この方法は簡便ではあるが間接的であるため、 α 線の強度が弱いにしても本当に検出できているのかわからない。そこで、 α と β 線を同時にしかも区別して検出できるシンチレーションサーベイメータ（以降、サーベイメータと呼ぶ）を導入し、それぞれに対する遮へい材の効果を調べた。放射能鉱物が近くにあると、サーベイメータの検出窓をアルミ板で遮へいしても、 β の計測数が見掛け上かなり増えることが確認された。これはプラスチックシンチレータで、 β 線だけでなく γ 線も検出されるためである。

1. はじめに

2011年3月に起きた福島第一原発の放射能漏れによる環境汚染は、まだ収束の道筋すら見えていない状況である。放射能の影響を不用意に受けたくないためには、やみくもに恐れるだけでな

く、正しい理解が必要である。少なくとも放射線には α , β , γ 線があり, それらの物質に対する透過性が異なること, ならびに内部被爆と外部被爆があることは, 常識として知っておく必要がある。放射線測定器としてインスペクターを, 2011年度より学生実験に導入した。これは, α , β , γ 線を全て合算して計測する簡易型のガイガーカウンターである。¹⁾ これを使って放射線の種類を見分けるには, 遮へい材の効果を調べることで, ある程度推定できる。このインスペクターの特性や実験テーマに関連する測定データは, 既に報告した。²⁾ ただし, α 線はサンプルをビニール袋に入れただけでも強度がかなり減衰し, また空気中の飛程も比較的短いことがわかっているので, α 線が本当に検出されているのか確証がもてなかった。そこで, α および β 線を区別して同時に計測することが可能なサーベイメータを導入して, これまであいまいだった点を明らかにすることにした。

2. シンチレーションカウンターの原理

2-1. シンチレータ

シンチレーションとは, 物質に放射線が当たると光を放出する現象である。³⁾ たとえば, NaI に Tl をドープした結晶に X 線があたると, 可視光が生じる。この光を光電子増倍管で増幅し, そのパルスの高さ(波高)を分析しながら, 生じたパルスを数えることで, X 線の光子の数を計測することができる。ただし, 放射線の粒子が1つ飛びこんできた直後は, 検出器が元の状態に戻るまでに少し時間がかかり, その間に次の粒子が飛びこんできてもカウントできない。これを不感時間といい, 放射線強度が高くなると数え落としが起こってくる。不感時間は検出器に固有な定数であり, 実測することができる。その不感時間をもとに, ソフトウェアで数え落とし補正を自動的に行うようになっている。

シンチレーションは液体や気体についても知られているが, ここでは固体について代表例を表1に示す。³⁾ 無機結晶に比べて, アントラセンなどの有機シンチレータは, 減衰時間が短いのが特徴である。ここで, 減衰時間とは, 発光における強度減衰の速さを表わす。初めの光の強さを I_0 とし, 時間 t 後の光の強度を $I(t)$ とすると, 次のように表すことができる。

$$I(t) = I_0 \exp(-t/\tau)$$

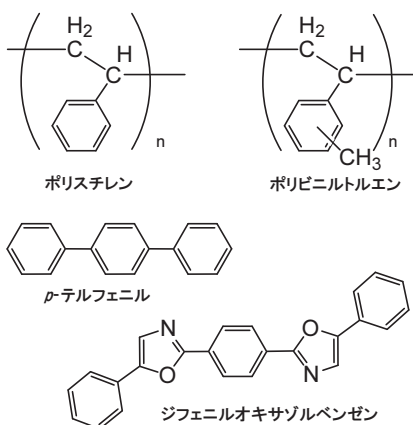
つまり, τ は発光強度が最初の $1/e$ になるまでにかかる時間であり, これを減衰時間あるいは減衰時定数と呼ぶ。無機結晶の減衰時間は μ 秒オーダーであるが, 有機シンチレータの場合は数十 n 秒オーダーと短く, 光電子増倍管で発生させたパルスを分離して計測するのに有利である。⁴⁾

プラスチックシンチレータは, ポリスチレンやポリビニルトルエンのようなポリマーの母体(溶媒とも呼ばれる)の中に, 第1溶質として *p*-テルフェニル, 第2溶質としてジフェニルオキサゾルベンゼン(POPOP)等を分散させたものである。³⁾ 芳香族のポリマーに放射線があたると π 電子が励起され, そのエネルギーが溶質に伝搬される。この分子間のエネルギー移動

表1. 固体シンチレータの種類³⁾

分類	成分	最大発光波長 (nm)	減衰時間 (ns)	相対効率 (%)	用途
無機結晶	NaI (Tl)	410	230	100	γ 線
	ZnS (Ag)	450	200	130	α 線, 中性子
有機結晶	アントラセン	445	~30	100	α 線, β 線
	<i>t</i> -スチルベン	410	4~8	~60	α 線, β 線
プラスチック	ポリマーに2種類の溶質を添加 [*])	370~434	1.4~4.0	46~68	α β γ 線, 中性子

^{*}) プラスチックシンチレータは、ポリスチレンやポリビニルトルエンの母体の中に、第1溶質として *p*-テルフェニル、第2溶質としてジフェニルオキサゾルベンゼン (POPOP) 等を分散させたものである。



は、非輻射的な双極子-双極子相互作用によるものと考えられている。⁵⁾ これは化学発光において、結合が解裂して生じたラジカルから蛍光色素へ、エネルギーが移動する機構と似ている。⁶⁾ 第1溶質は、溶媒からエネルギーを受け取って励起され、紫外線を発する。*p*-テルフェニルの場合、最大発光波長は335 nmである。⁵⁾ 第2溶質はこの紫外線を吸収し、可視光を放出する。POPOPの場合、最大発光波長は約410 nmである。⁷⁾ 紫外線はプラスチックの母体に吸収されるが、可視光は通過するので、光電子増倍管に達することができる。一般に、光電子増倍管で検出する光の波長は400 nm付近が最適であるため、放射線により生じた光の波長を一回変換しているわけである。⁵⁾

2-2. α と β 線の同時測定

従来は、無機結晶を使った α 線用検出器と有機シンチレーションの β 線用検出器は、別々に作られていた。しかし、それでは不便であり、不経済でもある。最近になって2つのシンチレ

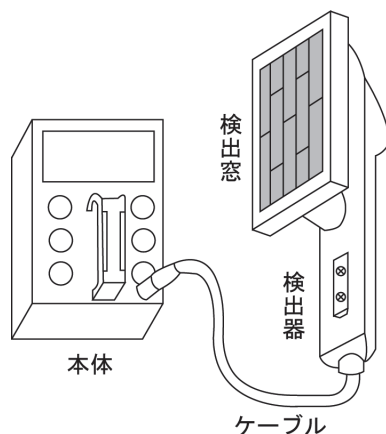
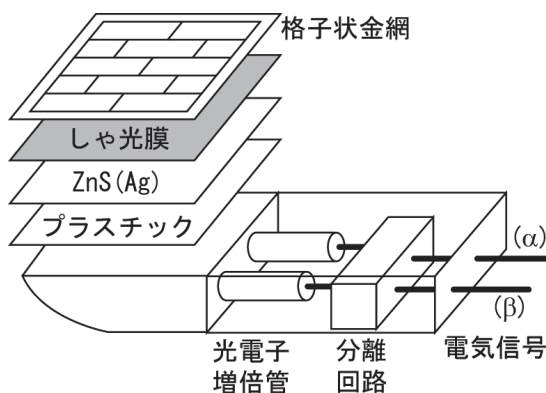


図1. サーベイメータTCS-362の外観

図2. サーベイメータTCS-362の内部構造 (模式図)⁹⁾

ーションを組み合わせで一体化し、 α と β 線を分割して同時に測定する方式が開発された。⁸⁾ 日立アロカメディカル(株)社製サーベイメータTCS-362の外観を図1に示す。⁹⁾ 検出器が本体とケーブルで結ばれており、検出窓は $60 \times 120 \text{ mm}^2$ と広い。保管や持ち運びが便利のように、検出器の根元に金具がついていて、これを本体中央のレールに差し込んで固定できるようになっている。検出器の内部構造を、図2に模式的に示す。外側の遮光膜はアルミを蒸着させた薄いフィルムで、外部から紫外線や可視光が入るのを防いでいる。その下は2層構造になっている。外側のZnS(Ag)シートが α 線用シンチレータであり、その内側に β 線用プラスチックシンチレータが入っている。ZnS(Ag)シンチレータは、アセチルセルロース膜の表面を、ZnS(Ag)の粉末でコーティングしたものである。¹⁰⁾ これら2種類のシンチレータから発せられる可視光が混ざって、2本の光電子増倍管(PMT)に入る。このPMTを2本使うのは、ノイズを除去するためである。シンチレータから出た光であれば、2本のPMTに同時に入射す

表2. シンチレーションサーベイメータTCS-362の検出効率⁹⁾

同位体	壊変形式 (および比率)	α と β 線のエネルギー (MeV)*	効率**
²⁴¹ Am	α (100%)	α 5.486 (86), 5.443 (13) 他	37.6*
³⁶ Cl	β^- (98.1%), EC ⁺ β^+ (1.9%)	β^- 0.709; β^+ 0.12	38.7

* α 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。¹⁴⁾

** サンプルと検出器との距離が0で、立体角 2π としたときの検出効率である。⁹⁾

※ 購入したサーベイメータの検査結果によると、 α から β への混入率は1.7%。⁹⁰Sr-⁹⁰Yを用いたときの β から α への混入率は0.003%である。⁹⁾

るはずだから、その場合だけ信号を発生させる方式 (同時計数法) がとられている。¹¹⁾

光電子増倍管から出力されるパルスの波形をもとに、分離回路において α と β が区別される。その際の決め手は、 α と β のパルスの減衰時間、つまりパルス幅の違いである。 α 線によりZnS (Ag) から生じるパルスの半値幅は約300 n秒であるが、 β 線によりプラスチックシンチレータから生じるパルスの半値幅は、5~10 n秒程度とかなり短い。¹⁰⁾ α 線分離フィルターでは時定数を2 μ 秒程度に設定し、それよりも幅の広いパルスだけを拾うことで、 α 線の信号を取り出している。そして、 α と β の両方のパルスが混在している信号から α 線の信号を差し引くことによって、 β 線の信号を得ている。¹²⁾ なお、サーベイメータTCS-362の取扱説明書によると、混入率は β から α が0.1%以下、 α から β が5%以下となっている。⁹⁾ これは、幅広いパルス信号である α の部分を取り出す際に、 β の信号が間違っ入り込む可能性は低い、うまく検出されなかった α のパルスが、 β の信号とみなされてしまう可能性が数%ある、ということを示している。 α と β 線の検出効率は、表2に示すようにほぼ同程度になるように設定されている。ただし、この種の検出器の欠点として、プラスチックシンチレータが β だけでなく γ 線も検出することが指摘されている。¹³⁾ このため、日立アロカメディカル (株) 社のカタログでは、TCS-362のプラスチックシンチレータが測定する放射線として、 β (γ) 線という表現が使われている。なお、シンチレータを3層にして、 α 、 β 、 γ 線を分別して同時に計測する装置も開発されつつある。¹³⁾ いずれにしても、計測結果が妥当な値になるように各種の補正が施されているので、ユーザーはそのことを頭に入れた上で、これらの装置を使う必要があるであろう。本稿では、サーベイメータTCS-362が β として表示する計測数を β (γ) という表現ではなく、 $\beta + \gamma$ と表すことにする。

3. 実験

3-1. バックグラウンド

サーベイメータTCS-362でバックグラウンドを測定して、インスペクターのカウント数と比較した。その際に、周りの環境がどの程度影響するか調べるために、あえて放射能鉍物標本

表 3. バックグラウンドの測定

検出器	検出窓の面積 (cm ²)	測定場所* ³⁾	検出窓の遮へい	10分間の計測値* ⁵⁾		
				α	$\beta + \gamma$	合計
インスペクター* ¹⁾	18.1	A	なし			471
			アルミ* ⁴⁾			450
		B	なし			351
			アルミ			341
サーベイメータ* ²⁾	72.0	A	なし	4	2435	2439
			アルミ	6	2423	2429
		B	なし	7	1669	1676
			アルミ	6	1536	1542

*¹⁾ 簡易型ガイガーカウンターであり、 α 、 β 、 γ 線を合算して計測する。

*²⁾ サーベイメータ TCS-362は、 α と $\beta + \gamma$ 線を区別して計測する。

*³⁾ 場所 A と B は放射能鉛物標本を格納している箱から、約1.3 m と 8 m の距離とした。

*⁴⁾ 検出窓の遮へいには、厚さ0.5 mm のアルミ板 5 枚を用いた。

*⁵⁾ 10分間で 2 回計測し、平均値を求めた。

を格納している箱から約1.3 m の近距離 (A) と、約 8 m の遠距離 (B) の 2 か所で測定した。その結果を表 3 に示す。インスペクターは、 α 、 β 、 γ 線をすべて合算した形で計測する。これに比べて今回使用したサーベイメータは、 α と $\beta + \gamma$ について別々のカウント数が得られる。測定結果からまずわかることは、 α 線の寄与が無視できるほど小さいということである。検出窓をアルミ板 (厚さ計2.5 mm) で遮へいすると、外から α 線も β 線も検出器内に侵入できない。それにもかかわらず、測定場所を B から A に変えると、バックグラウンドが約1.5 倍に増えた。アルミ板による検出窓の遮へいの有無は、結果にあまり影響していない。これは、明らかに γ 線の影響である。 γ 線は物質に対する透過力が強く、プラスチックでもアルミ板でもほぼ減衰することなく通過する。つまり、検出器内をより強い γ 線が通過したことで $\beta + \gamma$ の計測値が上がったと考えられる。インスペクターに比べてサーベイメータの計測値が 4 ~ 5 倍程度であるが、これは検出窓の面積が約 4 倍であることから妥当と思われる。

表 3 をみると、インスペクターの検出窓をアルミ板で覆うことで、バックグラウンドがわずかながら下がっているように見える。この変化が有意かどうか調べるために、さらに次のような実験を行った。所有しているインスペクター 11 台を横に並べて、バックグラウンドを 10 分間 2 回ずつ測定した。その際に、(a) まず遮へい材なしで行い、また (b) 検出窓にアルミ板 (厚さ0.5 mm) を 5 枚あてたときと、(c) 検出窓だけでなくその反対側の面にもアルミ板を 5 枚あててサンドイッチにしたとき、また (d) ステンレス製のテストプレート (これ以降は鉄板とよぶ) で検出窓をカバーしたときと、(e) 検出器を鉄板でサンドイッチにしたとき、そ

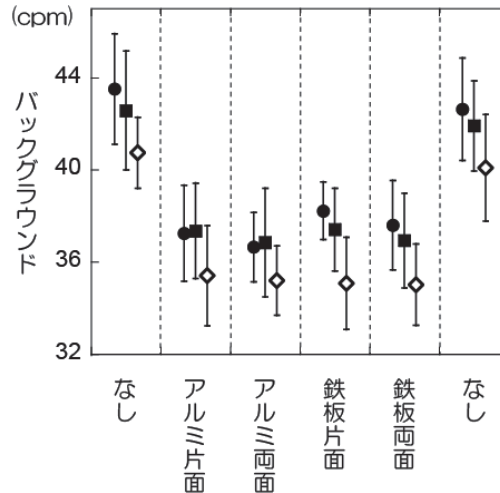


図3. インспекターによるバックグラウンド測定時の遮へい材の効果。放射能鉍物標本を格納してある箱から約2.5 mの距離で、インспекター11台を用い、それぞれの遮へい条件で10分間2回ずつ計測し、全体の平均値を求めた。測定の最初と最後に、遮へい材なしで計測した。再現性をみるために、これを2セット測定した(図中の●と■のプロット)。また、放射能鉍物標本を遠くの別室に隔離して、もう1セット測定した(図中の◇のプロット)。各プロットにつけた縦棒は、標準偏差($\pm\sigma$)である。

して (f) 最後にふたたび遮へい材なしで測定した。この一連の測定 (a) ~ (f) をセットとして、2回行った。その際に、放射能鉍物標本が格納してある箱から約2.5 mの距離で行った。この標本の箱を遠くの別室に隔離して、さらに3セット目を測定した。測定結果を図3に示す。それぞれのプロットは、インспекター11台×2回の平均値であり、縦棒は標準偏差($\pm\sigma$)を示している。このグラフから、アルミ板あるいは鉄板で検出窓を遮へいすることで、バックグラウンドが下がる効果は確かにあるといえる。また、検出窓の反対側の面は、遮へい材を追加してもあまり変わらないことから、外部からの β 線を検出器それ自身で十分に遮へいしていることがわかる。測定の3セット目に比べて、1, 2セット目が全体的に2 cpm程度上がっている。つまり、放射能鉍物標本から2.5 mの距離とはいえ、 γ 線によってバックグラウンドが上がっていることがわかる。

3-2. マントルの測定

マントルからの α および $\beta + \gamma$ 線強度を測定した。マントルはCAPTAIN STAG (パール金属) 製のもので、微量のトリウムが含まれている。²⁾ サンプルからサーベイメータ検出窓までの距離を一定に保つために、アクリル板などを重ねて図4のようなブリッジを作り、そこに検出器をかぶせるようにして置いた。そして、サンプルが十分かくれる位の大きさの紙を途中に入れ、枚数を増やしながら遮へいの効果を調べた。しかし、この方法では、紙の枚数を増やしても弱いながらかえって α 線が強くなるという、異常な変動がみられた。種々検討した結

果, サンプルの上を紙で覆うだけでは不十分であり, α だけでなく β 線についても, 検出窓の方を完全に紙でカバーして測定する方が妥当であることがわかった。サンプルからの距離を変えて, 遮へい材の紙の枚数を 0 から 7 枚まで増やしたときの α および $\beta + \gamma$ 線強度の変化を図 5 に示す。 $\beta + \gamma$ 線に比べて α 線の強度が圧倒的に少ないが, マントルと検出窓とが 5 mm という近距離の場合, 明らかに α 線が観測され, またそれは紙 1 枚でほぼ完全に遮断されていることがわかる。 β 線も紙によってある程度減衰していく様子がわかる。その減衰の仕方が紙の枚数に対して直線でほぼ近似できるが, 近距離の 5 ~ 15 mm においては紙の枚数が少ないときにプロットが直線から上の方へずれている。前回の報告でインスペクターを使って同様な実験を行い, 同様に近距離において紙が 0 から 1 枚のときに直線からずれることを示し, それは α 線の寄与であると推定した。²⁾ しかし, 今回の結果から, 直線からのプロットのずれは元々 β 線でもそのような傾向がみられ, α 線の寄与はそれと同程度である。つまり, 前回の報告では α 線の寄与を過大に見積もっていたことがわかった。

次に, $\beta + \gamma$ の計測値に対する γ 線の寄与の大きさを調べるために, マントルからサーベイメータの検出窓までの距離を 15 mm に保ち, アルミ板 (厚さ 0.5 mm) を遮へい材として 0 から 7 枚まで増やしたときの $\beta + \gamma$ 線強度の変化を調べた (図 6)。アルミ板の枚数を増やすと, 徐々に強度が減衰していくが, これは β 線が遮断されるためである。アルミ板を 5 枚以上に増やしても, ほとんど強度がそれ以上減らない。これは, γ 線がアルミ板を通過できるからである。つまり, 検出窓をアルミ板 5 枚以上で遮へいしたときに, サーベイメータに便宜上 β として表示されるカウント数は, γ 線の寄与である。そこで, これ以降, この報告書ではこれを γ と表現することにする。

遮へい材がない状態で, マントルから放出される α 線と β 線が空气中をどこまで到達できるか調べた。 α 線強度の距離依存性を図 7 (a) に示す。²³²Th から放出される α 線のエネルギーは, 4.02 MeV (77%) と 3.96 MeV (23%) であることがわかっている。¹⁴⁾ このエネルギーの値から, 空気中での飛程は約 25 mm と推定される。²⁾ 図 7 (a) をみると, この 25 mm を超えたところでもまだ α 線が検出されていることがわかる。その理由は, 単に飛程という場合, 平均飛程 (強度が半分に減衰する距離) のことをさしているからである。近距離の部分を除き, α 線強度が距離と共に直線的に減衰している部分をもとに, その直線と横軸との交点を求めた。このようにして得られた到達距離 43 mm は, 外挿飛程と呼ばれる。³⁾ 実際には 65 mm のところまで弱いながらも到達している。 α 線強度の距離の -1 乗依存性を図 7 (b) に示す。一番短い距離 (サンプルから検出窓まで 5 mm) の測定データを除くと, 距離の逆数に大体比例するような形で減衰していることがわかる。距離の -2 乗ではなく, -1 乗に対して図示したのは, あくまでも全体的な傾向をつかむためであり, この件に関して後でまた触れる。

β 線については最大エネルギーはわかっているものの, 広いエネルギー分布をもつ。また, 物質中で直進するわけではなく, ジグザク運動をする。このため, 話は単純ではないが, $\beta + \gamma$ 線の方も, 図 8 (b) をみるとわかるように, サンプルからある程度遠ざかると, 距離の逆数にほぼ比例して減衰することがわかる。ただし, それらの直線は原点を通ってはいないので,

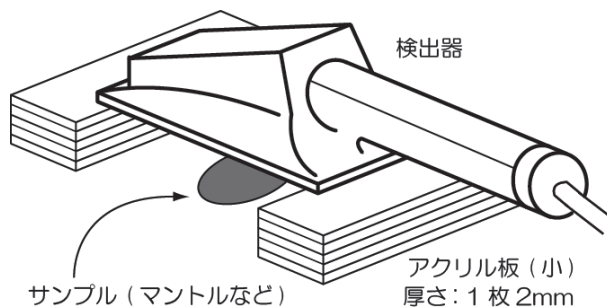


図4. サーベイメータを使つての測定。サンプルから検出窓までの距離を保ちながら，途中に遮へい材を入れた。

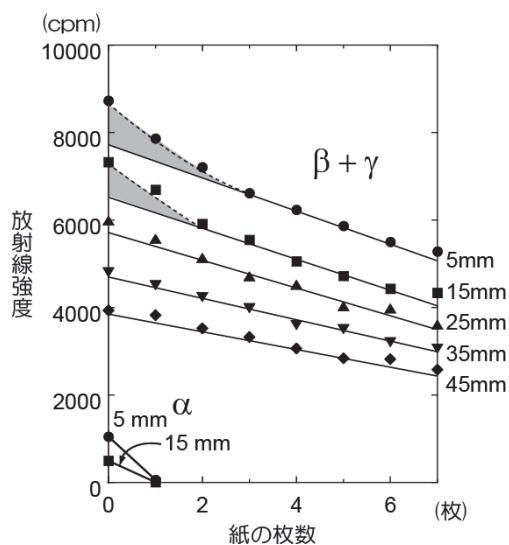


図5. マントルからの α ， $\beta + \gamma$ 線の紙による減衰の程度の距離依存性

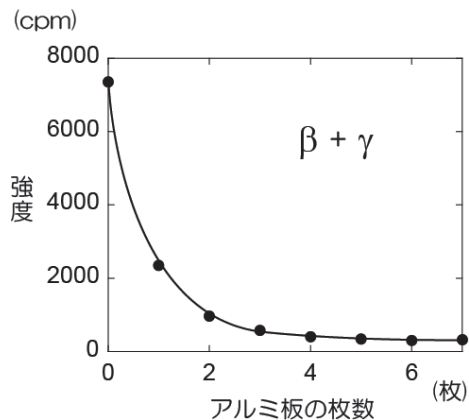


図6. マントルからの $\beta + \gamma$ 線強度のアルミ板(厚さ1枚0.5mm)による減衰。マントルから検出窓までの距離は15mm。

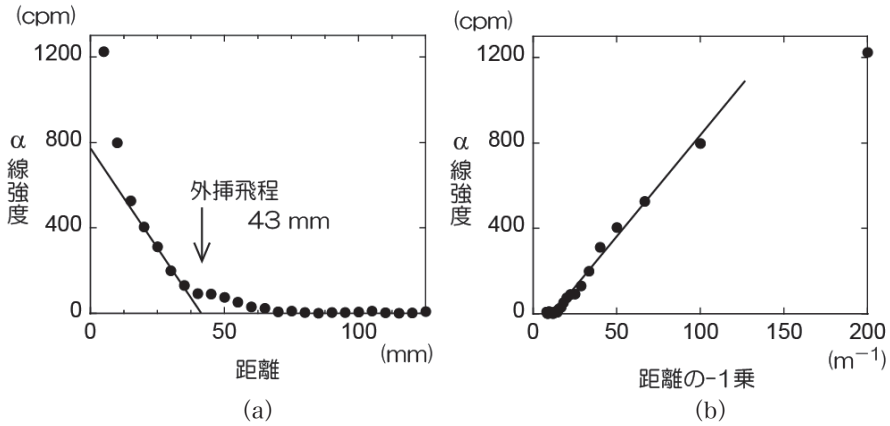


図7. マントルからの α 線強度の (a) 距離, および (b) 距離の-1乗に対する変化

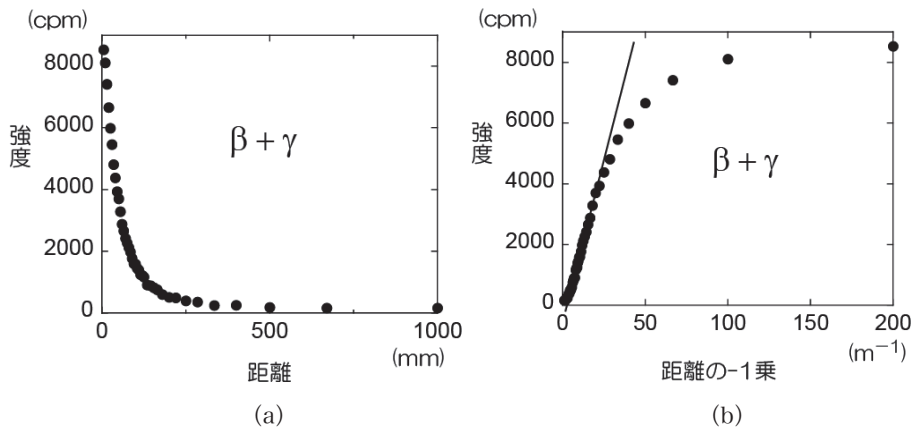


図8. マントルからの $\beta + \gamma$ 線強度の (a) 距離, および (b) 距離の-1乗に対する変化

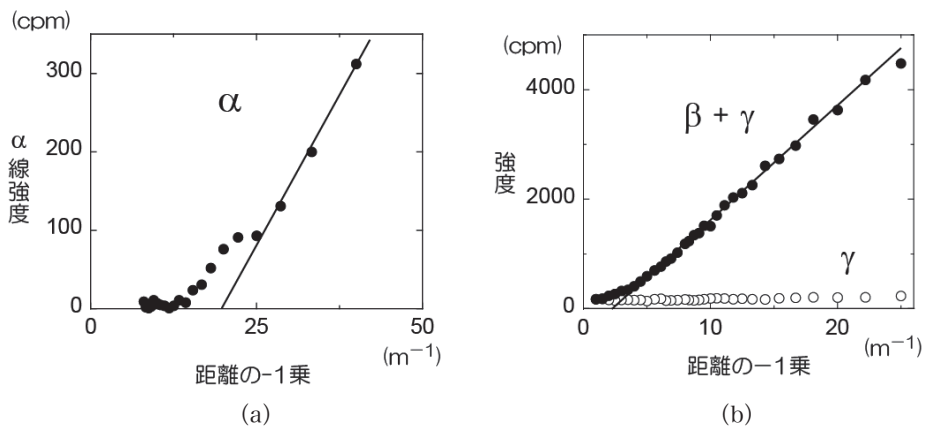


図9. マントルからの (a) α , (b) $\beta + \gamma$ および γ 線強度の距離の-1乗に対する変化の原点付近の拡大図。距離にすると, (a) 25 mm 以上, (b) 40 mm 以上。 γ 線の強度は, 検出窓をアルミ板 (厚さ計 3 mm) で遮へいして計測した。

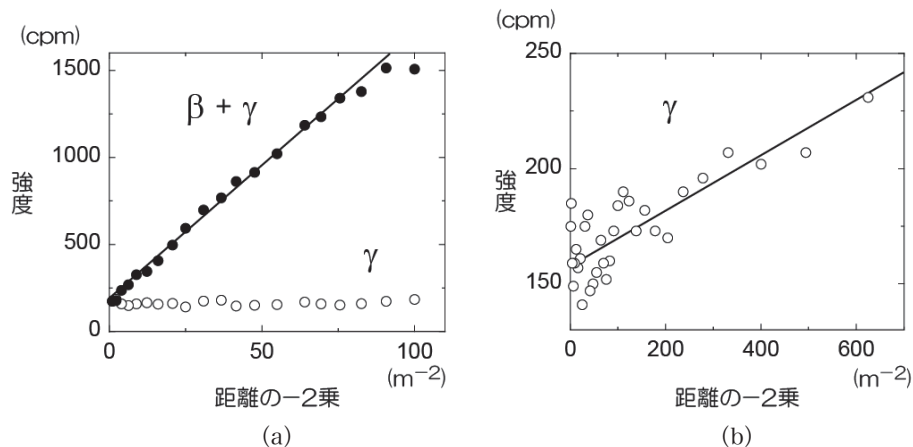


図10. マントルからの距離の-2乗に対する変化, (a) $\beta + \gamma$ および γ 線強度 (距離100 mm 以上), (b) γ 線強度 (距離40 mm 以上)。 γ 線の強度は, 検出窓をアルミ板 (厚さ計 3 mm) で遮へいして計測した。

厳密には比例していない。 α および $\beta + \gamma$ 線の距離の-1乗依存性のグラフについて, 原点付近の変化を拡大して図9に示した。特に α 線については, 原点より手前の位置でバックグラウンド程度の強度になっていることがわかる。また, プラスチックシンチレータで計測される放射線は大部分が β であり, サンプルから検出窓までの距離が1 m となって, 強度がバックグラウンド程度になったときに γ 線の寄与が無視できなくなる。なお, γ 線強度は, 放射線源からの距離の-2乗に比例することが知られている。これは光の照射面積が距離の2乗に比例して広がることに対応する。今回使用したサーベイメータの検出窓の面積 $60 \times 120 \text{ mm}^2$ は, サンプルとして用いたマントル (直径約65 mm) の数倍の広さがある。このため, サンプルと検出窓までの距離が比較的短いと, 放射線の拡散の効果が表れにくいものと推定される。実際に, 距離が100 mm 以上のデータを使って, $\beta + \gamma$ 線の距離の-2乗依存性のグラフを描くと, 図10 (a) のような直線に近いグラフとなる。 γ 線の寄与についても, プロットの範囲を広げて距離が40 mm 以上のデータをプロットすると, 図10 (b) に示すように, 距離の-2乗に比例して減衰している様子がわかる。ここでy切片はバックグラウンドを意味する。

3-3. 放射能鉱物などの測定

KCl や放射能鉱物標本からの, α と $\beta + \gamma$ 線強度をサーベイメータで測定した。 α 線の空気中の飛程を考慮して, サンプルの表面から検出窓までの距離を約9 mm とした。サンプルは通常, 汚染防止ならびに内部被爆を防ぐためにビニール袋に入れているが, それでは α 線が遮断されてしまう可能性が高い。そこで, 袋から出したときと, 袋に入れたときとで両方測定することにした。放射能鉱物は, ベタフォ石, モナズ石, ユークセン石の3種類について, それぞれ一番強度の強いサンプルを用いた。測定結果を表4に示す。まず, 全体としていえる

表4. KCl, マントルおよび放射能鉍物標本から放出されている α と $\beta + \gamma$ 線の強度

サンプル		強度 (cpm)*		強度比 $\alpha / (\beta + \gamma)$
		α	$\beta + \gamma$	
袋なし	KCl	4	1,079	0.004
	マントル	806	8,126	0.099
	ベタフォ石	1,190	60,690	0.020
	モナズ石	334	14,958	0.022
	ユークセン石	315	16,217	0.019
袋入り	KCl	2	841	0.002
	マントル	160	8,261	0.019
	ベタフォ石	83	63,285	0.001
	モナズ石	68	15,181	0.004
	ユークセン石	4	15,859	0.0003

* サンプル表面からサーベイメータの検出窓までの距離を約 9 mm に固定し, 1 分間測定した。

ことは, $\beta + \gamma$ 線に比べて α 線は 1 桁以上少ないということである。 ^{40}K は 100% が β^- 崩壊であり, α 線は放出しないので, KCl のときにわずかに検出された α 線は, バックグラウンドの影響である。また, 予想通り, サンプルをビニール袋に入れることで, α 線の強度が相当下がっている。 $\beta + \gamma$ に対して α の比率が最も高いのはマントルであり, 袋から出した状態で $\alpha / (\beta + \gamma)$ の比が 0.099 もあるが, 袋に入れると 0.019 まで落ちる。ビニールは紙 1 枚と同じように, β 線をほぼ通過させるが, α 線はかなり遮へいしていることが確かめられた。なお, 表 4 をよく見ると, 袋なしに比べて袋入りの方が $\beta + \gamma$ 線強度がやや増えているケースもあるが, これは検出器に対してサンプルの位置や向きが厳密に同じでなかったり, あるいは放射線強度の統計変動などのためと推定される。

サーベイメータの検出窓には, 図 2 に示すように遮光膜がはってあり, これで外から紫外線や可視光が検出器の中に入らないようにしている。それはアルミニウムを蒸着した薄いフィルムである。この膜に対して, α と β 線がどの程度透過性があるのか調べることにした。マントルをビニール袋から取り出した状態で, サーベイメータの検出窓から 9 mm の位置に置き, 検出窓に遮光膜をもう 1 枚追加したときと追加しないときとで各 1 分間交互に 5 回ずつ計測し, 平均値を求めた (表 5)。遮光膜による減衰の程度は $\beta + \gamma$ が 5% であるが, α は 36% も減少している。通常のビニール袋による減衰 (表 4) と比べれば落差は小さいので, これでもよく工夫されていると見なすべきであろう。

表 5. 遮光膜による放射線の遮へい

膜追加	強度 (cpm)*	
	α	$\beta + \gamma$
なし	741	8,310
あり	472	7,854

* むき出しのマントルの表面からサーベイメータの検出窓までの距離を約 9 mm に固定した。遮光膜を追加しないと1枚追加したときとで、各1分間交互に5回ずつ測定し、平均値を求めた。

4. 考察

4-1. 遮へい材の置き方

α 、 β 検出器を導入することにより、マントルや放射能鉱物標本から、明らかに α 線が放出されていることが確認できた。ただし、 α 線を検出するには、サンプルを袋などに入れずにむき出しにし、また検出窓までの距離を 1 cm 以下にする必要がある。 α 、 $\beta + \gamma$ 線について、紙による遮へいの効果を調べるときに、サンプルの上から紙をかぶせるだけでは不十分であることがわかった。これは、サーベイメータの検出窓がかなり広いため、紙の裏から回り込んでくる α や β 線も検知してしまうものと推定される。それを避けるために、紙で検出窓を覆うようなカバーを作り、そのカバーの中に紙を追加する方式を取った。また、測定時には検出器をブリッジの亚克力板に押し当てて、紙のカバーと検出窓との間に隙間ができないように注意した。これにより、妥当なデータが収集できるようになった。

4-2. α 線の飛程

α 線は物質との相互作用が強く、空気中でも高々 10 cm 程度しか進めない。 α 線のエネルギーが高い程、物質中の平均到達距離（これを平均飛程あるいは単に飛程という）も長くなる。これはあくまでも、 α 粒子全体の飛距離である。マントルについて、実際には平均飛程 25 mm の約 2 倍の距離まで達しているものもある（図 7 a）。これは、空気中で α 粒子が、窒素や酸素分子などと大多数が相互作用している中で、素通りする確率も少しはあるためと推定される。いずれにしても、 α および β 線は荷電粒子からなるため、空気中を通過する際に周りの原子や分子と相互作用しやすく、それに伴い運動エネルギーが急激に減少していくものと考えられる。

5. 学生実験への対応

5-1. シンチレーションカウンターの利用

学生実験では、「自然放射線と放射能鉱物」というテーマで、インスペクターを使って、

KCl とマントルから出ている放射線のうち、 α 、 β 、 γ のいずれが主に検出されているかを、遮へい材を使って判定することを課している。ただし、遮へい材の種類だけでなくその厚さにも注意しないと、判定を誤る結果となる。アクリル板でブリッジを作り、図4と同じようにサンプルと検出器との間に遮へい材を入れるとき、その遮へい材でサンプルを押して動かしてしまうと、放射線強度がかなり下がり、それによって判断ミスをする場合もある。この点で、 α と $\beta + \gamma$ 線の区別がつくサーベイメータは、大変魅力的ではあるが、結果がすぐわかってしまうので、遮へい材の効果をもとに推定するという思考過程が、色あせてしまう。また、比較的高額のため、台数も限られているし、検出窓が汚染したり破損する可能性も出てくる。このため、実験テーマには直接組み込まずに、頃合いを見てインストラクターが、演示測定してみせるのがよいと思われる。 α と $\beta + \gamma$ 線が違う音調のクリック音で聞けるので、 α 線の空気中の飛程が短いことを、わかりやすく示すのに都合が良い。

5-2. バックグラウンドの測定

学生実験では、実験に先立ち2台のインスペクターを用いて、一方は鉄板あり他方は鉄板なしでバックグラウンドを5分間計測し、それを学生に伝えていた。その2つの数値にあまり差がなく、鉄板を使った方がかえって数値が高く出る場合もあった。このため、バックグラウンドは鉄板の有無にはあまり左右されないものと思っていた。しかし、今回の測定で鉄板を使うことで有意にバックグラウンドが下がること(図3)、つまり検出窓に外から β 線が入ることでバックグラウンドが少し押し上げられていることがわかった。

インスペクターの個体差はどの程度あるのだろうか。そこで、11台のバックグラウンド測定値(図3の3セット目のデータを使用)を比較したところ、図11のようになった。計測値の高

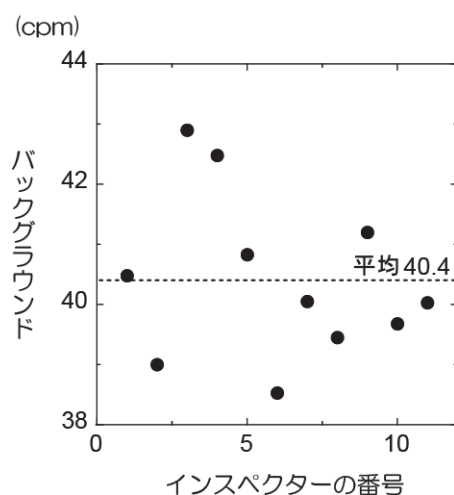


図11. インスペクター (No.1 から11) によるバックグラウンド測定値。遮へい材なしの状態では、10分間を4回ずつ測定し、それぞれ平均した(図3の3セット目のデータを使用)。

いものと低いものとの差が4 cpmであり、これは鉄板を入れることによるバックグラウンドの減少幅5 cpmとほぼ同程度である(図3)。したがって、鉄板ありとなしとでバックグラウンドを比較するためには、2台のインスペクターを使用するのではなく、1台で条件を変えて計測すべきであることがわかった。

謝辞

自然放射線と放射能鉱物に関する実験テーマの新設は、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。また、ここで報告した実験についての改良は、慶應義塾大学日吉教室予算(日吉主任預かり分)および調整費からの助成金を用いて行われた。

参考文献

- (1) “Inspector⁺ and Inspector EXP⁺ User Manual,” S.E. International (2006).
- (2) 大場茂, 向井知大, 小島りか, 「ガイガーカウンターを用いた放射線強度測定実験」慶應義塾大学日吉紀要, 自然科学 No.51, 43-60 (2012年)。
- (3) 「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)。
- (4) (株)東芝, 「 α β 検出装置」特開2008-14953 (2008年)。
- (5) Lally, C.H., Davies, G.J., Jones, W.G. & Smith, N.J.T. (1996). “UV quantum efficiencies of organic fluors,” Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B **117**, 421-427.
- (6) 大場茂, 向井知大「化学発光の実験でのライトスティックの利用」慶應義塾大学日吉紀要, 自然科学 No.49, 1-18 (2011年)。
- (7) Dutta, A.K. (1997). “Spectroscopic Study of Nonamphiphilic 2,2'-*p*-Phenylenebis(5-phenyloxazol) (POPOP) Assembled in Supramolecular Langmuir-Blodgett Films,” J. Phys. Chem. B **101**, 569-575.
- (8) 山村精仁, 石倉剛, 上田治, 「放射線検出器」富士時報 **72**, 309-312 (1999年)。
- (9) 日立アロカメディカル(株), 「 α / β 線用シンチレーションサーベイメータ TCS-362 取扱説明書」および「同検査報告書」(2012年)。
- (10) Usuda, S. (1992). “Development of ZnS(Ag)/NE102A and ZnS(Ag)/Stilbene Phoswich Detectors for Simultaneous α and β (γ) Counting,” J. Nucl. Sci. Technol. **29**, 927-929.
- (11) 「放射線入門」第2版(鶴田隆雄著, 通商産業研究社, 2008年)。
- (12) アロカ(株), 「放射線検出信号弁別回路」特開平5-19061 (1993年)。
- (13) Yamamoto, S. & Hatazawa, J. (2011). “Development of an alpha/beta/gamma detector for radiation monitoring,” Rev. Sci. Instrum. **82**, 113503.
- (14) 「化学便覧」改訂5版基礎編I(丸善, 2004年) pp.38-63。