

簡便かつ教育効果の高い放射線実習教材について

五郎丸(新海)美智子¹ 中 沢 克 江² 清 水 真 紀³
黒 田 潤¹ 西 口 慶 一¹ 中 浜 隆 之⁴
秋 本 義 雄⁵

A Simple Experimental Teaching Material for Radiation with Educative Effect

Michiko GOROMARU-SHINKAI¹, Katsue NAKAZAWA², Maki SHIMIZU³,
Jun KURODA¹, Yoshikazu NISHIGUCHI¹, Takayuki NAKAHAMA⁴,
Yoshio AKIMOTO⁵

概 要

文部科学省は小学生向けおよび中・高校生向けに放射線副読本を作成して学校教育の中で、放射線に関する科学的理解を深めようとしている^{1,2}。放射線に関する教育を目的とした資料は文科省以外にも環境省、放射線医学研究所、科学技術振興機構などから多く発信され、一定の効果をあげていると考えられている。しかしながら、その教育効果は「資料を読む」や「授業を聞く」といった受け身の方法よりも、自分の手を動かして「演習する」や「実験を行う」といった能動的な方法の方が非常に大きいといわれている³。そこで放射線の科学的理解に通じる実習教材が必要となるが、実施するために特別な設備が必要であったり、実験に長時間を要したり、実験を行う者に高度な手技が必要だったりするとRI施設を持つ一部の大学では可能であっても小学校、中学校、高等学校では利用することができない。そこで今回、簡便で安全な放射線実習の実験教材を報告する。

密封ラジウム線源の放射線量をGMサーベイメーターにて測定する。遮へい物が何もない状態でカウントが数千cpmとなるように線源からの距離を調節し、その後材質の異なる3種類の遮へい板(鉛、アルミニウム、アクリル)を線源の上に重ねていき、それぞれ放射線を測定した。放射線量は遮へい板の枚数が増えるにつれて減少し、縦軸に放射線量(cpm)、横軸に遮へい物の面密度をプロットすると、どの材質でも2相性のグラフとなった。放射線の数を半分にするため必要な遮へい物の厚みである半価層(遮へいの指標となる値)は、初期相で鉛 208 mg/cm²、アルミニウム 179 mg/cm²、アクリル 215 mg/cm²であった。また2相目の半価層は鉛 1866 mg/cm²、アルミニウム 2670 mg/cm²、アクリル 1964 mg/cm²であった。

この実験を通して、遮へい物の材質が異なっても面密度で算出した半価層は概ね一定となる

¹ 東邦大学薬学部薬学総合実験部門

² 東邦大学薬学部スポーツ健康科学教室

³ 東邦大学薬学部薬物動態学教室

⁴ 東邦大学薬学部公衆衛生学教室

⁵ 東邦大学薬学部薬事法学研究室

ことが理解できる。また、遮へい物による放射線の減衰のグラフが2相性になることから、ラジウム校正線源の見かけのエネルギーは2つに分離できることが示された。

本実験は、特別な実験手技は必要なく、線源の紛失等、一般的な注意事項を守れば誰にでも安全に行うことが出来る。また受講者の年齢や予備知識に応じて説明の内容を変更するなどして、小学校から大学まで全ての児童、生徒、学生に有用な実習教材であると考えられる。今後は保健体育、養護などの教員に対し、実習を実施していきたいと考えており、初等、中等教育でも利用できるような内容にアレンジする予定である。

背 景

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震と津波により、福島第一原子力発電所で事故が起こり、この事故で放出された放射性物質は日本に多くの被害を与えた。以来、放射性物質が多量に降った地域では住民が自宅からの避難を強いられ、様々な地域で除染作業が進められている。千葉県船橋市は事故のあった原発から200 km 離れているが、市の保健体育課が月に一回の頻度で市内の小中学校の敷地内の放射線量を測定している（平成27年現在）。

文部科学省は放射線副読本を用意して、科学的理解を深めようとしている^{1,2}。副読本は原発事故がなぜ起こったのか、どんな人たちが被害を受けたのか、放射線から身を守るにはどのような方法があるのか、について図表を多く使い、児童・生徒に分りやすく作られており、もし全文を読むことができたならば、かなり正しく放射線を理解することが出来ると考えられる。しかし、教室の黒板前で話す先生の言葉を理解しているかどうかをはかるのは難しい一方で、一般に実験などでの体験は教育効果が高いとされている。

東邦大学薬学部において外部放射線の防護に関する実験は、臨床検査技師免許の取得のための必修の実習として約60～90名を上限に開講してきた。2011年6月10日、核医学診療にかかわる関連学会（日本核医学会、日本病院薬剤師会、日本診療放射線技師会、日本核医学技術学会）により「放射性医薬品取り扱いガイドライン」が作製され厚生労働省へ提出され、放射性医薬品の安全管理・安全使用の体制の確保と良質な医療の提供には、医師、診療放射線技師と薬剤師の協働が必要である、と明記された⁴。また将来的に放射性医薬品の調製を薬剤師が担当することも確認された。薬剤師は、医療のみならず小学校、中学校、高等学校での環境に関連して放射線教育に関与しており、このことは放射性医薬品、さらには広く放射線に関連した事項に対する薬学部における薬剤師教育への見直しにもつながることとなった⁵。このような経緯から、放射線に関する実習は、将来の必修化に備えて、内容の変更をせまられることとなっている。

以上の理由から、特殊な設備を必要としないで放射線を学ぶことができる簡便な実験は、薬学界のみならず広く世間から求められているため、今回本誌へ発表することとした。

方 法

1. 器具・材料

密封放射線源（サーベイメーターの校正線源。²²⁶Raが金属とプラスチックに挟まれている）

GM管式サーベイメーター アロカ TGS-133

三脚スタンド、クランプ（サーベイメーターを固定するため）

ピンセット、金属製の空き缶（実験を行わないときには空き缶に入れ、線源はピンセット

で扱う)

アルミ板 (厚さ 0.7 mm), 鉛板 (厚さ 0.3 mm), アクリル板 (厚さ 3.0 mm), 各 20 枚
電子天秤 (遮へい板の重さを測定するため)

定規 (遮へい板の面積を測定するため)

パソコン (Excel 2013 を使用するため)

2. 測定

2-1. 面密度の測定

用意した遮へい板の重さと面積から面密度を算出した。

	10 枚の重さ mg	1 枚の面積 cm ²	面密度 mg/cm ²
アルミニウム	34350	64	53.6
鉛	52380	49	107
アクリル	88490	49	181

なお遮へい板の厚さは、本実験と同じである必要はなく、適当な厚さ、面積の板を用意し、面積と重さから面密度を算出して計算に用いればよい。

2-2. 放射線の測定

GM 管式サーベイメーターでの放射線測定は、一般的な実習書に従い、5 回程度読み取った値の平均をとる方法でおこなった⁶。

まず密封放射線源を十分離れたところに置き、バックグラウンドを測定する。その後、プラスチック面を上にして線源を置き、測定する。このとき適当なレンジを選択して、カウントが 1 分あたり数千になるように線源からの距離を調節して、GM 管をクレンメルで固定する。

アルミ板を線源の上に 1 枚重ねて遮蔽し、測定値を記録する。続いて 2 枚、3 枚と重ねてゆき、その都度、測定値を記録する。測定値がバックグラウンドの数倍程度になるまで重ねる。鉛板とアクリル板についても同様に、線源を遮蔽するように重ねていき、測定値を記録する (図 1)。測定値はすべてバックグラウンドの値を差し引いて計算に用いる。

結 果

放射線量は遮へい板の枚数が増えるにつれて減少し、縦軸に放射線量 (cpm)、横軸に遮へい物の面密度をプロットすると、図 2 のようになった。今回の実験条件では、遮へい板を増加させても 400 cpm 程度より低い値にまで放射線量を減弱させる事はできなかった。グラフの放射線量はバックグラウンドを差し引いた値で書かれている。

初期値の 6000 cpm から 1000 cpm 程度までの値で半価層 (放射線を半分に減弱させるために必要な遮へい物の厚み) を算出すると、鉛 208 mg/cm²、アルミニウム 179 mg/cm²、アクリル 215 mg/cm² となり、遮へい物の材質が異なっても面密度で示した厚みでは一定の値になることが確認できた。900 cpm 程度からさらに低い放射線量の値で半価層を算出すると、鉛、アルミニウム、アクリルの順に 1866 mg/cm²、2670 mg/cm²、1964 mg/cm² となり、高い放射線量にあたる初期相で算出された値と同様に、遮へい物の材質が異なっても、ほとんど一定



図1 密封線源(校正用 ^{226}Ra)からの放射線量を測定する様子
 写真にある丸いものが校正用線源。金属とアクリルで完全に密閉されていて、通常の扱いでは放射性物質が外部へ漏れることはない。線源の上に遮蔽用の板を1枚ずつ徐々に重ねて置き、その都度サーベイメーターの指示値を読む。実験の操作は極めて単純である。

の値になった。

この実験の再現性は高く、GM管の位置を適当に変更して初期値を変えたり、実験者を変えても大きな変化が見られることはなかった。

考 察

本実験は、操作が単純、実験場所を選ばない、実験者の手技やコツは不用、失敗がない、など利点が多いことが特徴である。従って、小学校、中学校、高校における放射線教育から大学での物理学や環境学の実技実習、薬学部の放射線教育まで広く利用することができる。本実験について、いくつかの観点で考察した。

1. 初等・中等教育と放射線実験

文部科学省では副読本を用意して放射線教育をすすめているが、実験を行うとその体験を通して科学的理解が深まると期待できる。

今回の実験を小学校や中学校で実施することを考えてみると、いうまでもなく、遮へい物の厚みを「面密度」として理解するといった概念を初等教育で理解することは難しい。しかし、「厚さが1mm」であるとか、その2倍にあたる2mmであるというように、「長さ」で示す厚みは理解できると考えてよいと思う。そこで、アクリル製の下敷きを適当な枚数用意し、長さで示した場合の「同じ厚み」の鉛や鉄製あるいはアルミニウム製の板で放射線の減弱を測定すると、これほどにも材質の違いによって様子が異なるものかと驚くことになると思う。また、中等教育に取り入れるなら、原子番号の異なるいくつかの板を用意して同様の実験を行い、周

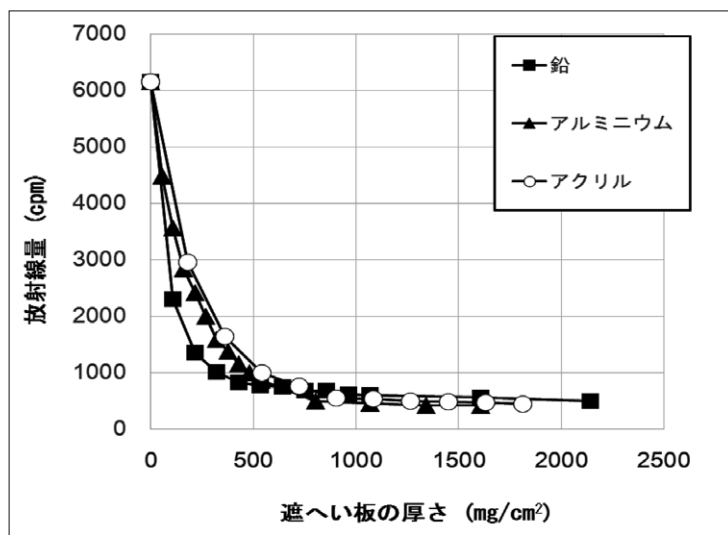


図2 鉛、アルミニウム、アクリルによる放射線の遮へい
縦軸はバックグラウンドを差し引いた放射線量 (cpm)、横軸は遮へい板の厚み (面密度 mg/cm²)。何もさえぎるものがないときに数千 cpm あった放射線が、遮へい板を線源の上に置いていくと減弱していく。減弱は、1000cpm あたりから緩やかになっている。

期律表を見ながら傾きと比較するという要素を加えると理科との関係を強くした内容となる。今後は、初等・中等教育向けにアレンジし、体育、理科、養護などの教員を対象にした実験を行いたいと考えている。

2. 薬学教育と放射線

一定量以上の放射線量を扱う場合、従事者には決められた訓練を実施し、その上で特殊な施設の中で行わなくてはならないが、裏をかえせば放射線を扱う実習であっても条件によっては通常の実習室や教室で行うことができ⁷、高校で実施できるような実験も作られているが⁸。東邦大学薬学部では、放射性物質を取り扱う実習として「放射医薬品実習」があり、非密封放射性物質を扱う実技を取り入れている。2011年に放射性医薬品取り扱いガイドラインが作られ、放射性医薬品の調製は将来的に薬剤師が担当することが確認されたが⁴、現在は主に設備 (RI 実験室) の事情と担当教員の不足により、履修人数に制限を設けて選択科目となっている。しかし、背景でも述べたように放射性物質の取り扱いについて大学での薬剤師教育の内容を見直す時期が迫っており、必修化を視野に入れた教材を開発していくことが必要となってきている。私立大学薬学部は定員 200 名を超える規模のものが多くあり、今回紹介した密封放射線源を用いた実験をはじめ、放射性物質を除いたコールドラン用の実験機材など、通常の実習室で安全に実施できる実習教材が有効と考えられる。

3. 学校保健教育と薬剤師

薬物が関わっている社会問題には、未成年者の喫煙や違法ドラッグの販売・使用、向精神薬

の大量使用など例を挙げればきりが無いほどあり、大きな事故や事件を引き起こす事態に陥っている。このような問題の解決策として、罰則の強化とともに有効なのは教育、とくに初等教育ではないかと考えられる。誤った方法や目的で薬を使うようになる機会や違法な薬物と出会う前に、正しいことを教えなければならない。

学校教育において初めて薬についての記載が登場するのは、小学校高学年の保健である。授業の中で児童生徒は、保健体育教諭（保健体育から委託をうけた養護教諭）から正しい薬の使い方を習うことになるので、小学校での保健教科は薬社会において大きな役割をもっている。薬を本来の目的以外に使用することを薬物乱用（濫用）というが、スポーツの競技能力向上を意図する場合をとくにドーピングといい、競技開始年齢の低下に伴い、初等教育でのアンチ・ドーピング教育が必要とされている。保健体育の担当教諭は、運動部活動の振興に寄与しており、教室で薬の理論を教えながら、体育実技や運動部活動を通して理論の実践をすることができる貴重な存在である。学習指導要領では薬の教育については、学校薬剤師などの外部講師の参画を奨励しているが、保健体育担当の教諭は、学校薬剤師の活動を支援する役割を担っていることから、保健体育担当者と学校薬剤師とが協力することによって、学校の保健衛生全体の向上に一層貢献できるものと考えられる。

今回報告した実験は、操作がきわめて簡単で小学生であっても実施することが可能であると考えられる。実験前までは、漠然と恐ろしい、目に見えない分からないものであった放射線のイメージが、目の前にあるサーベイメータの数値を読むことによって具体化することになる。器具の数などの問題により、クラス全員で実験することは難しくても、学校には委員会活動という素晴らしい制度がある。この制度を有効に利用し、保健部（クラスの保健委員）の活動として本実験を行い、理解できたことを児童生徒の目線でその体験を全校生徒の前で発表するという方法がある。放射線はプラスチックを含めていろいろな素材の板で遮へいできることや、放射線が当たり、通過した物質に何も痕跡が残らないことを知ることとなり、後々には一部の風評被害や偏見や差別を取り払うことにつなげていくことも期待できる。学校敷地内の放射線量測定は、船橋市では保健体育課が毎月実施しているので、今回の実験は学校や自治体の保健体育担当者を対象とした研修にも有用と思われる。

4. 理系大学の實習として：質量吸収係数（ μm ）の算出

本実験は、データ測定が簡単で誰にでも行うことができるが、質量吸収係数を求めることで薬学をはじめ理科系の大学の實習としても有用である。

GM サーベイメータは、気体の電離現象を利用した放射線測定器であるが、電離箱や比例計数管とは異なり一次電離とは無関係に出力パルスの大きさは一定であるので、線源のエネルギー情報は得られない。しかしながら、遮へい板を用いて放射線量の減少を測定して半価層（ x ）を求め、質量吸収係数（ μm ）を算出することができるので、 γ 線のエネルギーが大きいほど吸収係数が小さくなるという関係から、間接的にエネルギーの大小について概算を見積もることができる⁹。

はじめの入射放射線の強さを I_0 、吸収体（遮へい板）通過後の放射線の強さを I 、吸収体の厚みを x とすると、次式で表すことができる。

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \quad \dots \dots \dots \text{式 A}$$

ここで $I = 1/2 \cdot I_0$ になるときの x が半価層なので代入すると、

$$1/2 \cdot I_0 = I_0 \cdot e^{-\mu x}$$

$$1/2 = e^{-\mu x}$$

$$\ln 1 - \ln 2 = -\mu x$$

$$-\ln 2 = -\mu x$$

$$x = \ln 2 / \mu \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式 B}$$

$$\mu = 0.693/x \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式 C}$$

となり、半価層 x と吸収係数 μ の関係式が導かれる。よって、半価層 (mg/cm^2) を求めると質量吸収係数 (cm^2/mg) が算出できる。

今回、初期値から 1000 cpm 程度までの部分での実験データを用いて、半価層を求めると鉛、アルミニウム、アクリルの順に 208, 179, 215 mg/cm^2 であったので、質量吸収係数は、3.33 cm^2/g , 3.87 cm^2/g , 3.22 cm^2/g となった。つづいて 900 cpm 程度以下のグラフから半価層を求めると鉛、アルミニウム、アクリルの順に 1866, 2670, 1964 mg/cm^2 であったので、質量吸収係数は、0.371 cm^2/g , 0.260 cm^2/g , 0.352 cm^2/g となった。質量減弱係数は、物質の材質によって大きく異なることはないが、相互作用する放射線のエネルギーに大きく依存する。質量減弱係数 (μ_m) とエネルギーとの関係は、NIST (アメリカ国立標準技術研究所) のホームページに公開されているので、算出された μ_m から凡その見かけのエネルギーを見積もることができる¹⁰。従って、今回の実験条件では、約 3 cm^2/g と約 0.3 cm^2/g の2つの質量減弱係数が観察されたことから、見かけの放射線のエネルギーは1つでなく、小さなエネルギーと比較的大きな2つに分けられることが示された。²²⁶Ra は α 崩壊をして ²²²Rn となり、²⁰⁶Pb になるまで崩壊する過程で β 崩壊をする同位体が多数あることから、多様なエネルギーを持つ放射線が放出される。本実験はエネルギーを直接測定しているのではないので、測定条件により生じる様々な誤差を含んだものとして考えなければならない。 β 線を発生する ⁹⁰Sr-⁹⁰Y を線源に用いた同様の実験では、今回と同様に厚さを増すごとに急激に計数の減少する部分と、その後直線に続いて傾きが緩徐になる部分に分かれる現象が見られるが、その原因に γ 線の関与を挙げている¹¹。

放射線が遮へい板によって右下がりに減弱していく様子は、薬物の血中濃度が体内で代謝や排泄によって低下していく様子によく似ている。薬物動態学実習で一般に行われる実習では、薬物の体内の初期濃度を C_0 、経過時間 t での濃度を C 、薬物の消失速度定数を kel とすると、次の式で表すことができる。

$$C_t = C_0 \cdot e^{-kel t} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式 A'}$$

ここで $C_t = 1/2 \cdot C_0$ になるときの x が半減期 $t_{1/2}$ なので代入すると、

$$1/2 \cdot C_0 = C_0 \cdot e^{-kel t_{1/2}}$$

$$1/2 = e^{-kel t_{1/2}}$$

$$\ln 1 - \ln 2 = -kel t_{1/2}$$

$$-\ln 2 = -kel t_{1/2}$$

$$t_{1/2} = \ln 2 / kel \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式 B'}$$

$$kel = 0.693/t_{1/2} \quad \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \text{式 C'}$$

となり、薬物血中濃度の半減期 t と薬物の消失係数 el の関係式が求められる。前述した式 A は、放射線が遮へい板を透過することにより、どれだけ減弱するかを示し、式 A' は、薬物の血中濃度が代謝や排泄により、どれだけ消失するかを示す。同様に、前述した半価層と減弱係数の

関係を示す式 B, C は, 半減期と消失係数の関係を示す式 B', C' に対応する. 放射線の実験での半価層 x と減弱係数 μ との関係式 A, B, C と同様の式が成り立つ. 図 2 のような 2 相性のグラフは薬物血中濃度の体内変化で観察され, 薬物動態学の実習でよく利用される 2-コンパートメントモデルを用いたシミュレーションに当てはめて楽しむことも出来る¹². 薬学部の学生にとって薬物の血中濃度や半減期, 消失速度定数といったパラメータは馴染み深いので, 放射線の減弱を考えるとときに薬物の消失と比較し, 全く同じ式の展開であることが分ると, 理解しやすいのではないかと考えられる.

質量減弱係数と物質の関係は, 放射線厚さ計の原理であり, 工業界などで広く利用されている. そこで, 今回使用した鉛, アルミニウムだけでなく鉄や銅など色々な素材で, 様々な厚さの板を用意し, 板によって遮へいされる放射線量を測定することで遮へい物の厚さを求める, という実験に変えることも可能である.

一般に実験を行う前には十分に調べ物をすることが必要で, これから何を実験するかを理解してからでないと実験をする意味がない, とまでいわれることがある. しかしながら過密カリキュラムの中で, 関連科目の講義を先に行い, その後関連の実験を行うスケジュールを組む事は, 難しくなっている. 以前, 実験を行う前に十分に講義を聞いてから実技に入るグループと, はじめに実技を行った後に講義を行ったグループとで, 同時に復習試験を行ったことがあるが, 結果には違いがなかった¹³. たとえ分からなくても“やってみる”ということはその行為自体に意味があり, とくに初等教育では, 後になって他の知識や経験を得ることで肉付けされ徐々に理解できるようになるのではないだろうか. 体験はそれ自体が学ぶ者に深い印象, 記憶を残すので, まずはやってみることを, 実験していただくことが最も大切ではないかと思う.

5. 一般市民に対する教育

一般の生活者の不安が風評被害を呼び, 無関係な者に対する不利益が発生することは報道等によりよく知られている. その不安は安心できないことであって, 安全がいくら保証されても安心には繋がらないことが多い. この不安を解消するための第一歩は不安の正体を正しく知ることである.

原発事故以来, 放射線とその安全性について極めて大きな関心事となっている. 放射線にとって安全とは何か, の正しい知識を得ることはそう困難ではない. しかし, 「安心」には知識以外に心情的側面が大きく関わっており, 知識が増えてから安心が答えが出しにくい. 知識の他に体験した感じ取ることも「安心」について考えるファクターとなり得るであろう.

今回紹介した実験などを通じ, 自己の体験として放射線に対し安心できるか, やはり不安があるか自分で考える手段の 1 つとなるであろう.

そのためには, 子どもから大人までの広い範囲への放射線を過度に恐れない・侮らないための知識の教授方法, 実験の教材と実施方法を工夫してきたいと考える.

参考文献

- 1) 文部科学省 小学生のための放射線副読本～放射線について学ぼう～
http://www.mext.go.jp/component/b_menu/other/_icsFiles/afiedfile/2014/03/03/1344729_1_1.pdf
- 2) 文部科学省 中学生・高校生のための放射線副読本～放射線について考えよう～
http://www.mext.go.jp/component/b_menu/other/_icsFiles/afiedfile/2014/03/03/1344729_2_1.pdf
- 3) Edgar Dale : Interpretation of Edgar Dale's Cone of Experience
<http://www.fsu.edu/~ids/fac2002/Edgar%20Dale.htm>

- 4) 日本核医学会, 日本病院薬剤師会, 日本診療放射線技師会, 日本核医学技術学会 放射性医薬品取り扱いガイドライン 第2版 2012年
- 5) 秋澤宏行, 向 高弘, 荒野 泰. 「話題 放射性医薬品取り扱いガイドライン」 ファルマシア 49(4) 315-319 (2013)
- 6) 日本アイソトープ協会編 放射線・アイソトープ: 講義と実習 1992年発行 丸善 東京
- 7) 藤崎信吾, 石井規雄. 高等学校生物におけるトレーサー実験 Isotope News 659:12-13 (2009)
- 8) 放射線を放出する同位元素の数量等を定める件 (平成十二年科学技術庁告示第五号) 最終改正 平成二十四年三月二十八日 文部科学省告示第五十九号
- 9) 佐治英郎, 前田稔, 小島周二 (編) 新放射化学・放射性医薬品学 第3版 2011年9月発行 南光堂 東京
- 10) National Institute of Standards and Technology X-Ray Mass Attenuation Coefficients <http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab3.html>
- 11) 滋賀県総合教育センター GM 計数管による β 線の吸収実験 理科実験機器活用の手引き 1998年3月発行 pp.144-156
- 12) Yamaoka K, Tanigawara Y, Nakagawa T, and Uno T A pharmacokinetic analysis program (multi) for microcomputer. J Pharmacobiodyn 4:879-85 (1981).
- 13) 五郎丸 (新海) 美智子, 西口慶一, 成末憲治, 中沢克江. 実技と実習の順序と薬学部学生の理解度について —植物色素の可視吸収スペクトル— 医学と生物学 155(4):175-181 (2011).