



Tokyo Gakugei University Repository

東京学芸大学リポジトリ

<http://ir.u-gakugei.ac.jp/>

Title	放射線数え落としによる放射線強度距離逆二乗則からの逸脱に与える影響：中学・高等学校の理科教員養成の試みを通して( fulltext )
Author(s)	佐藤,公法; 村上,英興; 高下,泰嗣
Citation	東京学芸大学紀要. 自然科学系, 69: 157-163
Issue Date	2017-09-29
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2309/148232">http://hdl.handle.net/2309/148232</a>
Publisher	東京学芸大学学術情報委員会
Rights	

# 放射線数え落としによる放射線強度距離逆二乗則からの逸脱に与える影響

—— 中学・高等学校の理科教員養成の試みを通して ——

佐藤 公法\*<sup>1</sup>・村上 英興\*<sup>1</sup>・高下 泰嗣\*<sup>2</sup>

環境科学分野

(2017年5月29日受理)

SATO, K., MURAKAMI, H. and TAKASHITA, Y.: Influence of counting loss on the inverse-square law of radiation. Bull. Tokyo Gakugei Univ. Div. Nat. Sci., **69**: 157-163. (2017) ISSN 1880-4330

## Abstract

We demonstrated the most suitable environment for exercising the inverse-square law of radiation, which appears in the three principles of protection from external exposure. It was found that measurement time, region of interest, background, and the intensity of radiation source have an influence on the distance variation of radiation intensity. In particular, the data were largely deviated from the inverse-square law due to the counting loss caused by the pile-up effect with the use of high-intensity radiation source. The results imply that low-dose environment such as 4 count per second (250 count per minute) is desirable for exercising the inverse-square law of radiation at class rooms with the measurement system as employed in the present study.

**Keywords:** external exposure protection, three principles, radiation measurements, inverse-square law, pile-up effect

*Department of Environmental Sciences, Tokyo Gakugei University, 4-1-1 Nukuikita-machi, Koganei-shi, Tokyo 184-8501, Japan*

**要旨:** 放射線外部被ばく防護の三原則の一つである放射線強度の距離逆二乗則（放射線強度が距離の二乗に反比例して減少すること）を実践するための最適な実習環境について考察した。測定時間、関心領域、バックグラウンド、放射線源強度が放射線強度の距離逆二乗則に影響することがわかった。とりわけ放射線源強度が強くなると、パイルアップによる放射線の数え落としが発生するため、測定データが逆二乗則から大きく逸脱する。本研究で用いたような放射線計測システムを講義室レベルで用いる場合、計数率で4 count per second (250 count per minute) 程度の低線量環境で実習を行うことが望ましいという結果が得られた。

---

\*1 東京学芸大学 広域自然科学講座 環境科学分野 (184-8501 小金井市貫井北町 4-1-1)

\*2 初等教育教員養成課程 理科選修 物理教室

## 1. はじめに

東日本大震災に伴う福島第一原子力発電所事故から6年以上が経過し、自然環境中に存在する原発事故由来の核種は、原子炉燃料ウラン235の核分裂生成物であるセシウム137(半減期約30年)がほとんどを占める<sup>1)</sup>。セシウム137はベータ崩壊によりバリウム137となるが、約95%が準安定同位体であるバリウム137mを経由する。バリウム137mの半減期は約2.6分で、662eVのガンマ線光子が放出される<sup>2)</sup>。セシウム137は土壌中の粘土鉱物に強く吸着する傾向が強いため<sup>3)</sup>、震災以降、ガンマ線はこれまで以上に身近なものとなった。一方で、2008年度の中学校学習指導要領改訂に伴い、「エネルギー資源」の項目の中で「放射線の性質と利用」に触れることが定められた<sup>4)</sup>。放射線に対する安全性、とりわけ“外部からの放射線に対してどのようにして身を守るのか”は大きな関心事となり、小・中・高等学校の理科の教員には、放射線に関して正確で高度な知識と理解がこれまで以上に求められるようになった。

放射線防護の基本原則は国際放射線防護委員会(ICRP)に基づき、放射線作業や施設内及びその周辺に居住する一般公衆の放射線被ばくをできる限り低いレベルに保つことにある<sup>5)</sup>。例えば診療現場では、X線発生装置からの放射線防護を行うことにより、放射線外部被ばくをできる限り低減させることが試みられる。放射線による外部被ばくの防護は、遮へい(shield)、時間(time)、距離(distance)に着目した三つの基本原則からなる。これを放射線外部被ばく防護の三原則という。距離に着目した原則は、放射線源との距離を離すことにより、空間線量率を低減するものである。距離による減衰効果は、点線源からの放射線の線束が距離の二乗に反比例(逆二乗則)することからも示されるように、放射線の線量率も同様に逆二乗の法則が適用できる。逆二乗の法則は、様々な物理現象に現れるだけでなく、視覚的にも理解しやすいシンプルな関数で記述できるため、教材開発の観点では重要である。

我々は、文部科学省「国際原子力人材育成イニシアティブ事業(原子力人材育成等推進事業費補助金)」の助成を受けて、放射線外部被ばく防護に関する実習を講義室レベルで実践する実習用教材を開発を進めている<sup>6)</sup>。平成27年度秋学期から、理科専攻学部生用に開設されている「専修物理学実験」、「物性物理学」、非理科専攻学部生用に開設されている「理科研究」、大学院修士課程理科専攻学生用に開設されている「環境自然科学教育研究法」、理科教員高度支援センターの現職教員用の研修プログラム「放射線計測の基礎」<sup>7)</sup>、教員免許更新講習「放射線計測の基礎と環境材料のナノ構造評価」で段階的に実践してきた。上記実習に合わせて行った理解度診断の結果から、放射線強度と距離の関係を示す実験データが逆二乗則に従っていないにも関わらず、多くの実習参加者が逆二乗則と答える傾向があることがわかった。本論文では、放射線計測の数え落としという現象に着目し、放射線強度の逆二乗則を実習する上で最適な実験条件について考察する。

## 2. 放射線の数え落とし

放射線計測は放射線検出で発生した電気パルスを計数回路で計数することにより行われ、1秒間あたりの計数率を表すcps(count per second)、または1分間あたりの計数率cpm(count per minute)で評価される。これは計測システムが計測した放射線の時間当たりのカウント数に相当する。計測システムには様々な要因で放射線の「数え落とし」が発生するため、得られる計数率が必ずしも検出器に入った放射線の数に対するものとは限らない。つまり、実際の放射線強度よりも低い値で計測されることになる。特に、計数率が高くなると、多数の放射線を計数するため、パルス同士が重なり合った状態となる。このような近い時間に発生したパルスが重なって見かけ上パルス高が高くなってしまふ現象のことをパイルアップという。パイルアップが起こった場合、重なり合った複数のパルスが1つのパルスと見なされるため、計数回路が計数した放射線は、実際に検出器が検出したものよりも少なくなる。これがパイルアップによる放射線の数え落としである。精度の高い放射線計測を行うためには、パイルアップを極力排除できる程度に計数率を下げておくのが望ましい。

## 3. 実験の方法

放射線外部被ばく防護に関する逆二乗則に関する実験は講義室で行った。放射性同位元素として、法規制対象外密封線源の放射能標準ガンマ線源CS401(核種:セシウム137, 公称放射能:10キロボクセル, 放射能規格:公称

放射能 $\pm 20\%$ ), 表示付認証機器である放射能標準ガンマ線源401CE (核種: セシウム137, 公称放射能: 1メガベクレル, 放射能規格: 公称放射能 $\pm 20\%$ )を用いた。この線源は公社日本アイソトープ協会が設計認証を受けた放射能標準ガンマ線源であり, 使用の目的は放射能及び放射能測定器の校正, 動作確認及び学生実験等の教材に限られている。本実習で用いた放射能標準ガンマ線源401CEは, 使用の開始の日から30日以内に原子力規制委員会に届出を行った。

放射線検出器には, イギリスkromek社製 (日本代理店は仁木工芸株式会社) のCdTeZn半導体検出器RadAngelを採用した。RadAngelは $5 \times 5 \times 5$ mmのCdTeZn半導体を搭載している。両方とも手のひらサイズであり, 世界初の個人向け放射線検出器である。iPhoneやiPadなどに接続してデータを取ることも可能であり, 簡便に使用することができる。本研究では, RadAngelをUSBケーブルを用いてWindowsタブレットに接続し, 無償制御用プログラムKSpectを用いてガンマ線スペクトロメトリーを行った。セシウム137から放出される662keVのガンマ線による全吸収ピークのカウント数を計測した。線源と検出器の距離を1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11cmにした状態で3分間のカウント数をグラフ化した。

#### 4. 結果

2015年12月27日に行われた平成27年度理科教員高度支援センター主催の現職教員用長期研修 (専門研修)「放射線の科学」で, 参加者の一人が作成したグラフを図1に示した。このデータは上述した表示付認証機器である放射能標準ガンマ線源401CEから放出される662keVのガンマ線のカウント数を, 距離を変化させながらRadAngelを用いて20秒間測定して得られたものである。図中の実線は研修参加者が測定したデータである。一方, 四角のシンボルは, 距離1cmのカウント数を基準にした距離の二乗に反比例する理論値である。測定値が距離とともに減少することは見て取れるが, 測定値と大きな隔たりがある。このような隔たりを生ずる原因として, 統計的な誤差, 不十分な測定精度, 計測システムにおける放射線の数え落としなどが考えられる。以下では, 測定時間, 関心領域, バックグラウンド, 線源強度の観点から考察する。

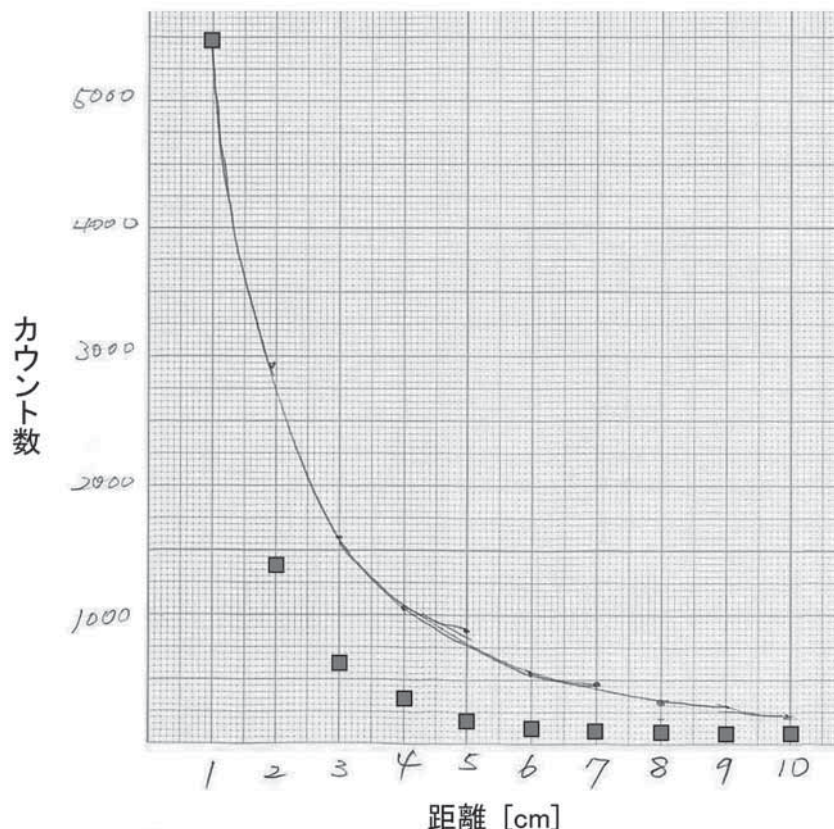


図1 平成27年度実習参加者の一人が作成した放射線強度距離依存性のグラフ (実線)。距離1cmのカウント数を基準にしてプロットした逆二乗則の値を四角で示している。



#### 4. 1 測定時間

放射線計測に伴う誤差は統計学的に偶然誤差と系統誤差に分類される。偶然誤差は偶発的な原因によって計測結果に導入される誤差で、その都度異なるものである。系統誤差は偶然によらない一定の傾向を持った誤差のことである。偶然誤差は測定を長時間行うことにより、小さくすることができる。ここでは、偶然誤差を減少させることを目的とし、上で述べた平成27年度の教員研修と同様の実験条件の下で測定時間を2分間に長くした。図2にガンマ線カウント数の距離依存性のデータを逆二乗則の計算値（実線）とともに示した。図1のものと比較して、データのばらつきは抑さえられている。測定時間を20秒から2分に延ばしたことにより、偶然誤差が小さくなったと考えられる。放射線源からの距離が4cmから11cmの領域では、逆二乗則によく従っていることがわかる。しかしながら、距離が3cmと線源に近くなると実線から逸脱し始め、さらに2cm、1cmと近くなるにつれて逸脱が大きくなっていった。線源と検出器の距離が近くなったために計数率が高くなり、パイルアップによる放射線の数え落としが発生していることが推測される。

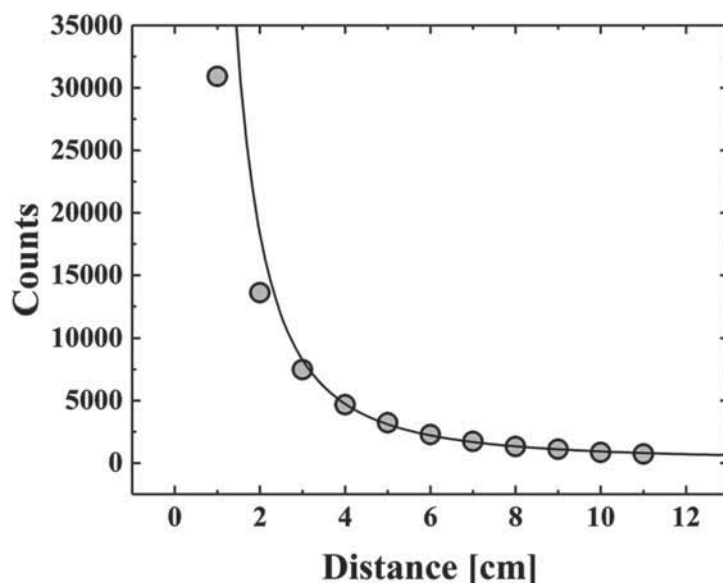


図2 ガンマ線カウント数の距離依存性のグラフ（丸）。逆二乗則の計算値を実線で示している。

#### 4. 2 関心領域の設定

放射線計測の分野で、関心領域はRegion of Interest (ROI) とよばれる。例えば、セシウム137から放出される662eVのガンマ線を計測する場合には、662eVを中心にROIを設定し、ROI中のイベントをカウントすることになる。これにより、コンプトン散乱、後方散乱、バリウムの特性X線などの効果を取り除くことができるため、ROIを最適に設定することは重要である。ROIの設定を広くすると、真のイベントに起因しない偽のノイズが含まれることになり、測定精度が劣化する。逆にROIの設定が狭すぎると、統計精度が悪くなり、データにばらつきが生じる。ここでは、ROIの設定が逆二乗則に与える効果について考察する。図2に示したデータは、662eVのガンマ線ピークを0チャンネルとし、ROIを±100チャンネルに設定した条件で測定している。今回用いた放射線計測システムでは、このようなROIの設定で662eVのガンマ線ピークをおおよそカバーすることができた。これに対して、ROIを±30チャンネルに設定した条件で取得したデータを図3に示した。それ以外の実験条件は、全て同様である。ROIが狭くなったために、全体的にカウント数が減少しているが、気になるようなデータのばらつきはない。カウント数の距離依存性は、放射線源からの距離が長い領域では逆二乗則によく従い、パイルアップによる放射線の数え落としのため、距離が長くなると逆二乗則曲線から逸脱していった。基本的に図2と同様の傾向を示したが、距離が2cmと3cmのデータの逆二乗則曲線からの逸脱がわずかに改善された。ROIを狭く設定することにより662eVのガンマ線以外のイベントに起因するカウント数が減少したため、測定精度が向上したと考えられる。

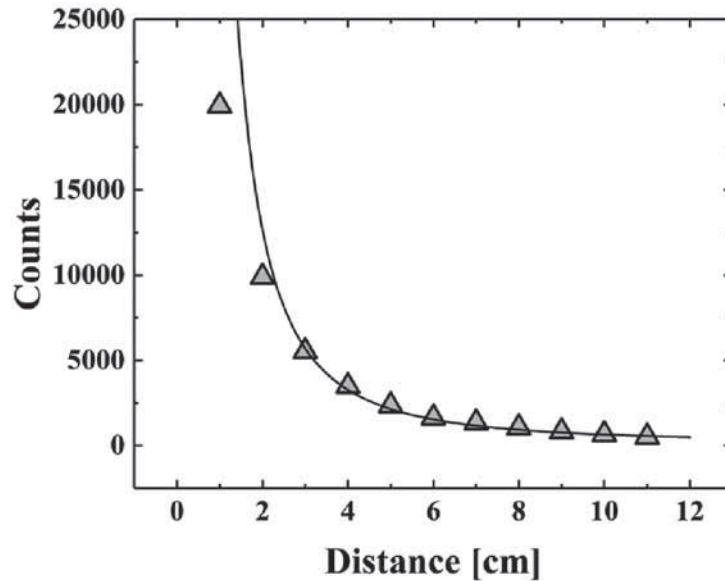


図3 関心領域を狭く設定した条件で取得したガンマ線カウント数の距離依存性のグラフ (三角)。逆二乗則の計算値を実線で示している。

#### 4. 3 バックグラウンドの補正

放射線計測を行う場合、バックグラウンドのために計測器の測定値は通常0にはならない。バックグラウンドの原因の一つは、宇宙線、地球上に存在する放射性物質、体内で発生する放射線で、一般的にバックグラウンド放射線と言われるものである。もう一つは、計測器や回路計のノイズに起因するバックグラウンドである。バックグラウンドは、周囲の環境に依存して変動し、バックグラウンドにも誤差は存在する。目的とする放射線を精度良く計測するためには、バックグラウンドの誤差が放射線計測により得られた測定値と比較して十分に小さいことが不可欠である。そのため、セシウム137から放出される662eVのガンマ線計測では、ガンマ線のスペクトルからバックグラウンドを適切に差し引く必要がある。ここでは、バックグラウンドの補正が逆二乗則に与える効果について考察する。図2に示したデータは、662eVのガンマ線ピークを0チャンネルとし、ROIを±100チャンネルに設定した条件で測定されたものである。これに対して、バックグラウンドの補正を、-100チャンネルのカウント数とプラス100チャンネルのカウント数を結んだ直線以下をバックグラウンドとする台形近似で行ったデータを図4に示した。バックグラウンドが差し引かれたため、図2と比較して、全体的にカウント数が減少しているが、気になるようなデータのばらつきは見られない。図2、図3と同じように、カウント数の距離依存性は、放射線源からの距離が長い領域では逆二乗則によく従い、パイルアップによる放射線の数え落としのため、距離が長くなると逆二乗則曲線から逸脱していった。図3と同様に、距離が2cmと3cmのデータの逆二乗則曲線からの逸脱がわずかに改善された。662eVのガンマ線以外のイベントに起因するカウント数が減少したため、測定精度が向上したと考えられる。

#### 4. 4 放射線源強度

放射線源の強度(放射能)が強くなると、計測システムの計数率が高くなる。そのため、パイルアップによる数え落としの効果が大きくなる。ここでは、数え落としの効果を抑制するために、法規制対象外密封線源の放射能標準ガンマ線源CS401(核種:セシウム137, 公称放射能:10キロボケレル, 放射能規格:公称放射能±20%)を用いた実験を行った。放射線源以外の実験の条件は、4-1のものと同様である。図5にガンマ線カウント数の距離依存性のデータを逆二乗則の計算値(実線)とともに示した。放射線源の強度が弱くなったために、カウント数が大幅に減少している。そのため、距離が3cm以上のカウント数に若干データのばらつきがあるが、全体的に逆二乗則によく従っている。低線量線源を用いることによりcpsが減少したため、パイルアップによる数え落としが抑制されたと考えられる。

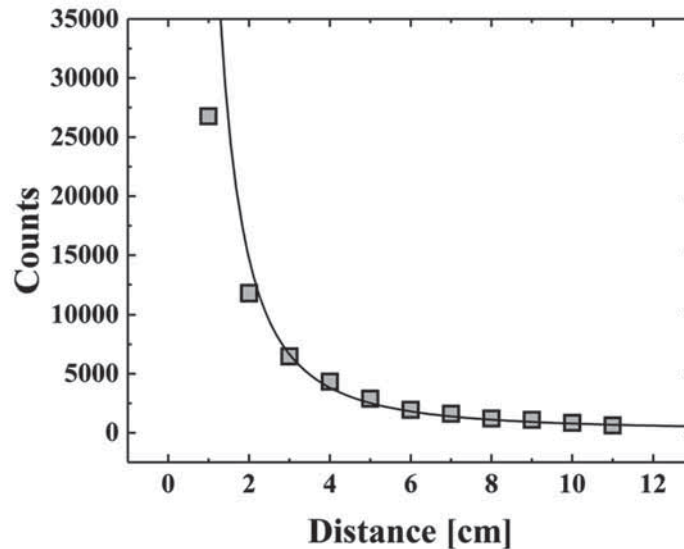


図4 バックグラウンドを補正して取得したガンマ線カウント数の距離依存性のグラフ (四角)。逆二乗則の計算値を実線で示している。

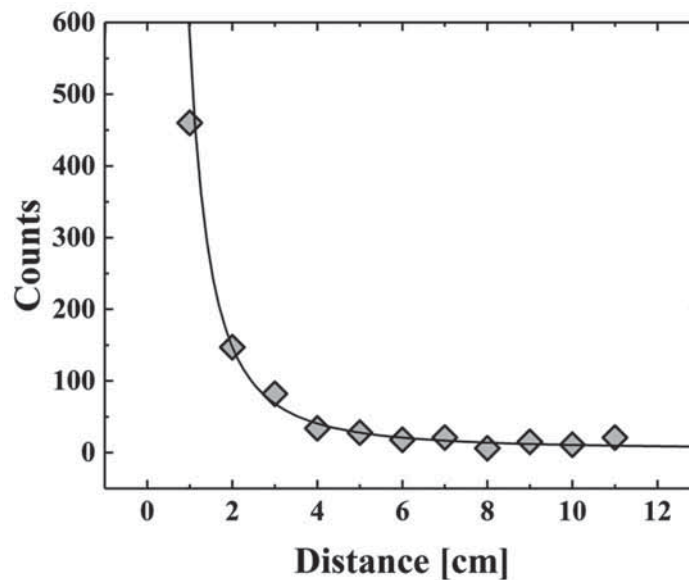


図5 法規制対象外密封線源の放射能標準ガンマ線源 CS401 を用いて取得したガンマ線カウント数の距離依存性のグラフ (ダイヤモンド)。逆二乗則の計算値を実線で示している。

## 5. 考察

上で得られた知見をもとに、講義室レベルで逆二乗則の実習を行う際に、最適な実験条件、及び注意すべき点について考察する。測定時間が短い場合、測定値が距離の増加とともに減少することは示すことができるが、全体的に逆二乗則曲線から大きく逸脱する。加えて、データもばらつく。測定時間を長くすると、データのばらつきが抑えられるだけでなく、偶然誤差が減少する。逆二乗則を満たすデータを取得するためには、それぞれの距離における測定時間は長めにすることが必要である。関心領域を広く設定し過ぎると、コンプトン散乱などの偽イベントに起因するカウント数が含まれるため、計測精度が劣化する。逆に狭く設定しすぎると、データがばらつく。これらは逆二乗則曲線からデータをわずかに逸脱させるため、関心領域は目的とするガンマ線ピークをおおよそカバーするように設定することが望ましい。計測システムにバックグラウンドは常に存在する。対象とする放射線を精度良

く計測するためには、バックグラウンドの誤差が放射線計測により得られた測定値のものと比較して十分に小さいことが不可欠である。そのため、放射線源を設置しない状態で事前にバックグラウンドの値や誤差を調べておく必要がある。バックグラウンドが不必要に含まれた状態では、計数精度が劣化し、逆二乗則からデータをわずかに逸脱させることになる。そのため、対象とする放射線に相当するスペクトルから、台形近似などでバックグラウンドを適切に差し引くことが重要である。放射線源の強度が強くなると、計測システムの計数率が高くなり、パイルアップによる放射線の数え落としが発生する。この放射線の数え落としの効果は、逆二乗則からの逸脱に大きく寄与する。放射線源に対して検出器の距離が近くなると、数え落としの効果は顕著になるため、逆二乗則曲線からさらに大きく逸脱する。本研究で用いた放射線計測システムの場合、計数率にして4cps (250cpm) 程度の環境が望ましいことになる。このような低線量の環境は放射線障害防止法規制対象外の線源で十分可能であり、講義室レベルでの実習に適していることを示唆している。低線量の環境は、データのばらつきとともに評価する必要がある。その際に、得られた曲線の形状だけから逆二乗則を思い込みで判断するのではなく、実際に値を入れた検算を行うことが重要である。一方で、使用している計測システムと放射線源の組み合わせで上述したような低線量環境が実現できない場合、データがばらつかない程度に距離を離すことが対応策であろう。

## 6. 結論

放射線外部被ばく防護の三原則の一つである放射線強度の距離逆二乗則（放射線強度が距離の二乗に反比例して減少すること）を講義室レベルで実践するための最適な実習環境について考察した。測定時間が短すぎると、データがばらつくだけでなく、全体的に逆二乗則曲線から大きく逸脱するため、ある程度は長くする必要はある。スペクトルに対する関心領域の設定が広い場合、またバックグラウンドの補正が不十分である場合、計測精度が劣化するため、二乗則曲線からデータがわずかに逸脱する。そのため、関心領域は目的とするガンマ線ピークをおおよそカバーするように設定すること、バックグラウンドは台形近似などで補正することが望ましい。放射線源の強度が強くなると、パイルアップによる放射線の数え落としが発生するため、測定データが逆二乗則から大きく逸脱する。本実習で用いたような放射線計測システムを用いる場合、計数率にして4cps (250cpm) 程度の環境が望ましい。使用している計測システムと放射線源の組み合わせでこのような低線量環境が実現できない場合、データがばらつかない程度に距離を離すことで可能になる。

## 7. 謝辞

本研究の一部は、文部科学省「国際原子力人材育成イニシアティブ事業（原子力人材育成等推進事業費補助金）」の助成を受けて実施されました。また、本論文を執筆するにあたり、東京学芸大学理科教員高度支援センターの松川正樹教授には、論文の企画、構成、内容について、教育に関する専門的視点より多くのご指導ご指摘をして頂きました。ここに多大なる感謝の意を表します。

## 8. 引用文献

- 1) Y. Morino, T. Ohara, M. Nishizawa Atmospheric behavior, deposition, and budget of radioactive materials from the Fukushima Daiichi nuclear power plant in March Geophys. Res. Lett. 38 L00G11 (2011)
- 2) 社団法人日本アイソトープ協会 アイソトープ手帳10版 丸善 (2001)
- 3) K. Sato, K. Fujimoto, W. Dai, M. Hunger Molecular mechanism of heavily adhesive Cs: why radioactive Cs is not decontaminated from soil J. Phys. Chem. C 117 1p4075-14080 (2013)
- 4) 文部科学省ホームページ, <http://www.mext.go.jp/>
- 5) 国際放射線防護委員会勧告, <http://www.icrp.org/index.asp>
- 6) 佐藤 公法, 竹内達哉, 安見周平 「放射線外部被ばく防護三原則の実験指導」に関する教材開発と評価：中学校理科教員を対象に 東京学芸大学紀要 自然科学系 68 p83-90 (2016)
- 7) 東京学芸大学理科教員高度支援センターホームページ, <http://www.u-gakugei.ac.jp/~ascest/>