

令和 3 年度修士論文

福島水稲圃場における放射性セシウムの土壌深度分布が地表  
で測定した  $\gamma$  線エネルギースペクトルに及ぼす影響

Effect of depth distribution of radioactive cesium in soil of  
Fukushima paddy field on gamma-ray energy spectrum measured  
on the ground

1245080 奥田 美弘

指導教員 百田 佐多生

2022 年 3 月 15 日

高知工科大学 工学研究科

基盤工学専攻 環境数理コース

# 目次

1. 序論.....	3
1.1. 営農再開への課題.....	3
1.2. 放射性物質分布測定 of 現状と本研究の目的 .....	3
2. 原理.....	4
2.1. $\gamma$ 線と物質との相互作用.....	4
2.2. コンプトン比 $R_c$ .....	4
3. 調査圃場及び測定位置の決定.....	5
3.1. 調査圃場及び活動日時 .....	5
3.2. 空間線量率.....	5
4. Ge 検出器を用いた放射能測定.....	6
4.1. Ge 検出器 .....	6
4.2. 土壌採取及びサンプル処理.....	6
4.3. Ge 検出器を用いた放射能測定 .....	7
4.4. 深度分布 .....	7
4.5. Fitting による深度分布の解析 .....	8
5. CsI 検出器を用いた圃場における放射能測定 .....	10
5.1. CsI 検出器 .....	10
5.2. CsI 検出器を用いた地表での放射能測定 .....	10
5.2.1. スペクトル解析 ~ ピーク解析 ~ .....	11
5.2.2. スペクトル解析 ~ コンプトン解析 ~ .....	12
6. 考察.....	13
6.1. 地表での放射能測定と深度分布の相関.....	13
6.1.1. 半値深さ $D_h$ .....	13
6.1.2. コンプトン比と半値深さの相関 .....	14
6.2. 深度分布に基づく地表での放射能測定 of コンプトン値の推定 .....	14
6.2.1. 推定方法.....	14
6.2.2. 推定結果.....	16
7. 結論.....	16
7.1. 水稲圃場における放射性セシウムの深度分布.....	16
7.2. 地表での放射能測定による深度分布の推定 .....	16
7.3. 深度分布に基づく地表でのコンプトン値の推定 .....	17
8. 謝辞.....	17
9. 参考文献.....	17

# 1. 序論

## 1.1. 営農再開への課題

福島県では 2011 年に発生した福島原発事故により、特に帰還困難区域では、2 つの理由で営農が不可能であった。

- ① 放出された放射性物質による圃場(農地)中の土壌の汚染
- ② 居住制限による農業従事者の避難生活

除染作業などによる①の低減とともに②の居住制限が解除または緩和され、営農再開の準備が整いつつある。しかし、土壌中における放射性物質の分布には非一様性があり、場所による差異が大きいことが問題となっている。除染作業等により生じた放射性物質の分布の非一様性は、作物への放射能汚染の影響が場所によって異なることを意味する。そのため、圃場内において正確に放射性物質の分布を把握する必要がある。しかし、震災後に実施された空間線量率マップ等の作成に用いられた航空機による測定には 2 つの問題点がある。1 つ目は、水平方向の空間的分解能である。航空機測定では航空機直下を中心に直径 300 m ~ 1500 m の範囲の平均値として空間線量率を算出している。しかし圃場内においては直径 10 m 以下の分解能が必要だと考えられるため、航空機測定では空間的な分解能が不十分である。2 つ目は、航空機測定では放射性物質の土壌中深度分布の測定が困難なことである。深さ方向の放射能分布は作物の放射性物質吸収に影響を及ぼすため、これを測定することは重要である。以上のことから、航空機測定に変わる新しい放射能分布の測定技術の開発が課題となっている。

## 1.2. 放射性物質分布測定の現状と本研究の目的

航空機測定による水平方向に対する空間的分解能の課題は、京都大学の谷垣氏を中心となって開発された KURAMA システム(Kyoto Univ. RAdiation MApping System)<sup>[1]</sup>で解決できる。しかし、深さ方向に対しては、圃場で採取した土壌を大学などの専門機関に持ち帰って Ge 半導体検出器(以下、Ge 検出器)等で測定して深度分布を算出している。しかし、この方法を使って広範囲の測定を実施するには、膨大な時間と手間が必要である。草原などの人的介入のない土壌を対象とした放射性物質の深度分布をその場で測定する手法について先行研究<sup>[2],[3]</sup>が行われているが、人的介入によって土壌が攪拌された土地での簡易的かつ効率的な測定法は未だ確立されていない。さらに、草原などの人的介入のない土壌を対象とした先行研究により、放射性セシウムの深度分布は指数関数を基調とした分布となっていることが確認されている<sup>[4]</sup>。また、放射性セシウムは時間経過によって深化することが確認されており、そのような場所では深度分布はローレンツ関数で表現できることが確認されている<sup>[2]</sup>。しかし本研究が対象としている水稻圃場では、耕耘などの人的介入によって深度分布に変化やばらつきが生じていることが考えられる。そのため水稻圃場の放射性セシウムの深度分布を調査する必要がある。

本研究の目的は、福島水稻圃場を対象とした放射性物質(特に放射性セシウム)の土壌中深度分布の簡易的かつ効率的な測定法の開発である。この目的のために、Ge 検出器を用いて決定した深度分布と土壌を採取した場所と同じ場所で CsI 検出器を用いて測定したスペクトルデータを比較し、両者の関係を調べた。CsI 検出器は、KURAMA システムに搭載されている放射線検出器である。得られた関係に基づい

て、放射性物質の深度分布推定の可能性を検討した。将来的には、深度分布推定手法を KURAMA システムに応用し、専門知識を持たない農業従事者が農作業を行いながら、深度分布の測定が可能になると期待される。

## 2. 原理

### 2.1. $\gamma$ 線と物質との相互作用

$\gamma$  線と物質との相互作用には、コンプトン散乱、光電効果、電子対生成の 3 つがある。このうち、本研究において重要となる相互作用は、1.022 MeV 以下の比較的低エネルギーで主要なコンプトン散乱と光電効果である。光電効果は、 $\gamma$  線が物質中の電子と衝突し、 $\gamma$  線が有する全てのエネルギーが電子に吸収される。このため、光電効果はエネルギースペクトル中で  $\gamma$  線の全エネルギーに対応する光電ピークとして観測される。これに対して、コンプトン散乱は  $\gamma$  線が物質中の電子と衝突し、 $\gamma$  線が有する全エネルギーの一部が電子に吸収される。このため、コンプトン散乱はエネルギースペクトル中で光電ピークより低いエネルギー帯(以下、コンプトン領域)で観測される。

### 2.2. コンプトン比 $R_c$

コンプトン散乱、光電効果は遮蔽物の影響を大きく受け、その結果エネルギースペクトルに影響を及ぼす。あるエネルギーの  $\gamma$  線が遮蔽物を通過するとき、コンプトン散乱が起こると、元のエネルギーよりも低エネルギーの  $\gamma$  線となり、観測される光電ピークの低下とコンプトン領域が増加する。これに対して、光電効果が起こると  $\gamma$  線が消滅するため、光電ピークとコンプトン領域の両者とも低下する。そこで、スペクトル中のコンプトン散乱(Fig. 1 中の B)、光電効果(Fig. 1 中の A)の影響が表れているエネルギー領域の  $\gamma$  線の計数値(それぞれ、 $Net_{compton\ area}$ 、 $Net_{photo\ peak}$ )を用いて、コンプトン比  $R_c$  を式(1)のように定義する。定義されたコンプトン比は  $\gamma$  線が通過する遮蔽物（本研究では土壌に対応）の厚さによって変化するため<sup>[3]</sup>、土壌遮蔽の影響を定量的に評価する指標として期待できる。

$$R_c = \frac{Net_{compton\ area}}{Net_{photo\ peak}} \quad (1)$$

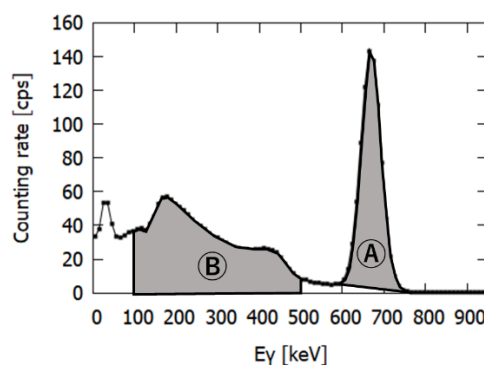


Fig. 1 CsI 検出器で測定した線源  $^{137}\text{Cs}$  のスペクトル

①は光電効果による光電ピーク、②はコンプトン散乱によるコンプトン領域の一部である。光電ピークは約 600 keV~700 keV、コンプトン領域は 100keV~500 keV とした。

### 3. 調査圃場及び測定位置の決定

#### 3.1. 調査圃場及び活動日時

本研究では、福島県の大熊町、富岡町、郡山市、飯舘村 (Fig. 2) の 10 圃場の計 43 か所で土壌採取を行った。調査圃場の情報を Table. 1 に示した。土壌採取を実施した場所の GPS 情報を付録に記載した。

Table. 1 調査圃場の情報

採取日	地域	帰還困難区域	採取数	備考
2019/4/23	大熊町	外	2	
2019/4/23	大熊町	外	1	
2019/4/23	富岡町	外	1	
2019/10/25	郡山市	外	3	
2019/12/18	大熊町	外	3	土壌採取のみ
2020/3/18	飯舘村	外	3	
2020/4/24	大熊町	内	11	
2020/4/24	大熊町	内	10	
2020/11/17	大熊町	内	5	
2020/12/17	富岡町	内	4	土壌採取のみ

#### 3.2. 空間線量率

土壌測定位置の決定のために、Fig. 2 のように圃場内を 9 分割しそれぞれの中央部で NaI サーベイメータを用いて空間線量率の測定を行った。空間線量率の測定結果の例を Fig. 3 に示す。測定結果を基に空間線量率が高い場所、低い場所、両地点から地理的に離れた場所等を土壌採取場所に決定した。

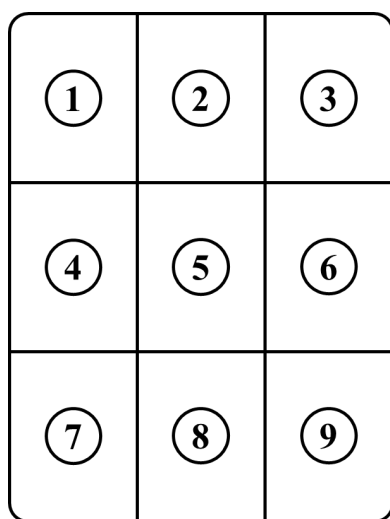


Fig. 2 圃場内での空間線量率測定位置

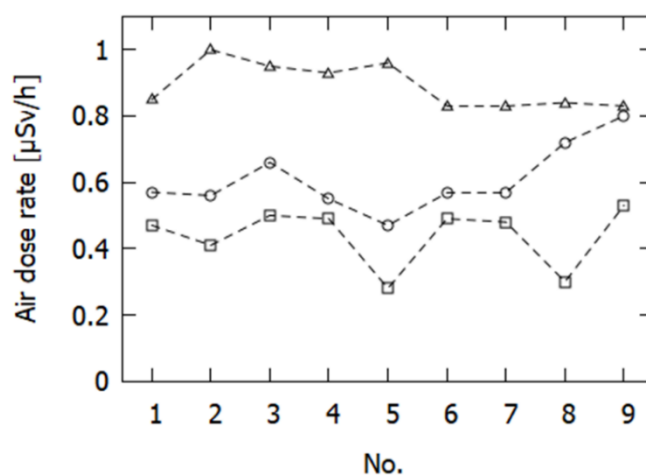


Fig. 3 圃場内の空間線量率の測定結果 (2019/4/23)

## 4. Ge 検出器を用いた放射能測定

### 4.1. Ge 検出器

土壌中放射性物質の濃度の精密測定のために、Ge 検出器(ITECH Instruments 社製 IGC-30185)を用いた。この検出器は、 $\gamma$ 線の電離作用、半導体の特性により、放射性物質からの $\gamma$ 線を検出し、高いエネルギー分解能で測定・計測できる検出器である。Ge 検出器のシステム構成図を Fig. 4 に示す。放射能測定時に検出部を低温に保つため、液体窒素を用いて冷却する。Ge によって $\gamma$ 線を電気信号に変換し、プリアンプ及びアンプによる電気信号の増幅、及び ADC にて電気信号の増幅、デジタル化を行いメモリに記録する。そして PC 及び解析ソフトによってスペクトル解析を行う。

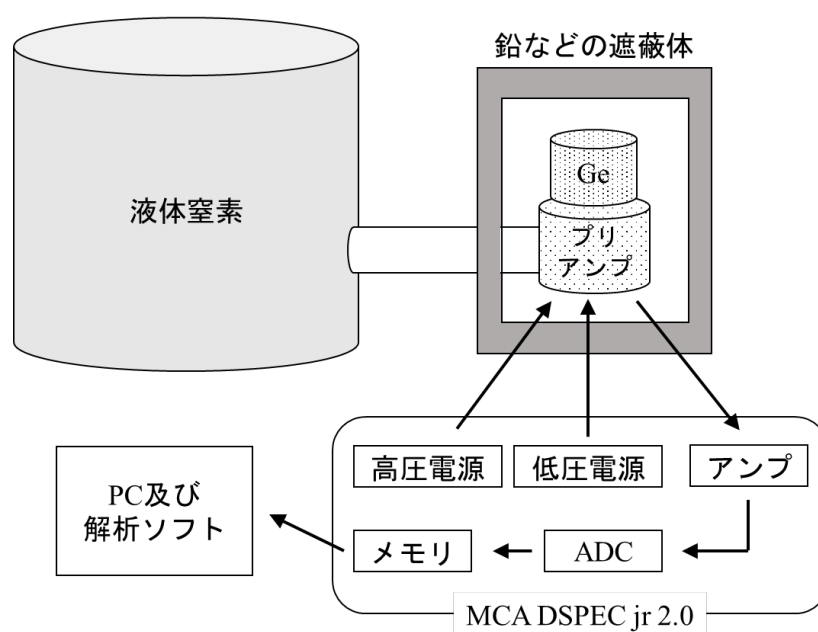


Fig. 4 Ge 検出器のシステム構成図

### 4.2. 土壌採取及びサンプル処理

土壌採取はライナー採土器(Daiki DIK-110C)を用いて、地表から深さ 30 cm までの土壌を採取した。Ge 半導体検出器による放射能測定のために、大学に持ち帰った採取土壌を以下の手順で処理をした。

- ① ライナーに土壌の表面から 2.5 cm ごとに線を引き、スプーンやビニール袋等を用いて深さごとに分けた。
- ② 深さごとに分別した土壌をビニール袋内で攪拌した後、U-9 容器に移し替えた。このとき、棒などを用いて表面が平らにした。また、サンプルが混同しないようにサンプル番号などを記載した。
- ③ 容器重量及び総重量から、試料重量を算出し、試料高さを計測して試料密度を算出した。また、容器に容器重量、総重量、試料高さを記載した。

### 4.3. Ge 検出器を用いた放射能測定

U-9 容器に封入した土壌サンプルから放出される  $\gamma$  線を Ge 検出器にて 5000 秒間測定した。測定で得たエネルギースペクトル中の  $^{137}\text{Cs}$  の光電ピーク(662keV)を解析して Net 値を求め、換算式(2)で補正して土壌中の放射能濃度  $A[\text{Bq/kg}]$  を求めた。さらに解析結果を深さ基準で整理して深度分布を求めた。

$$A\left[\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}\right] = \frac{N[\text{cps}]}{\eta \times B \times m[\text{kg}]} \quad (2)$$

$N[\text{cps}]$  は計数率、 $\eta$  は計数効率、 $B$  は  $\gamma$  線放出率、 $m[\text{kg}]$  は試料質量である。計数効率、 $\gamma$  線放出率の導出法については付録に記載する。

### 4.4. 深度分布

4.3.の方法で深度ごとに求めた放射能濃度を用いて、 $^{137}\text{Cs}$  の深度分布を得た。得られた深度分布の代表例を Fig. 5 に示す。本研究で測定によって得た土壌中  $^{137}\text{Cs}$  の深度分布は以下の 4 つに分類することができた。

- (a). 地表付近に集中分布
- (b). (a)より少し深い部分まで浸透している分布
- (c). ある深さまで一様分布
- (d). ある深さまで一様分布し、分布の下端で集中分布

(a), (b)の分布は先行研究[2], [4]中で観測された人的介入のない土壌と同様の分布であることが確認できた。一方、(c), (d)の分布に関しては、ある深さまで一様に放射性セシウムが分布していることから、除染や耕耘などの人的介入による影響であると予想される。

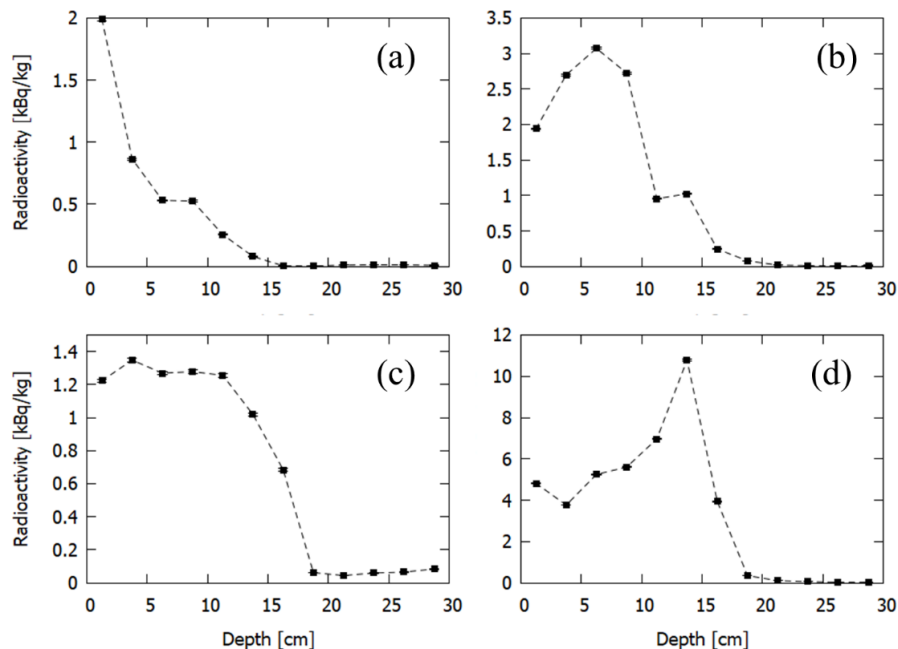


Fig. 5 圃場内の土壌中  $^{137}\text{Cs}$  の深度分布

(a) 20200424 Shimonogami L\_5、(b) 20191218 Okuma 7

(c) 20200424 Ogawara L\_1、(d) 20201217 Tomioka after\_high

## 4.5. Fitting による深度分布の解析

4.4.で導出した深度分布を 4 種類の分布に分類するために、それぞれの分布に対応する 4 種類の分布関数①～④を導入した。①と②は先行研究で導入された指数関数、ローレンツ関数、③は一様分布に対応するようにフェルミ関数、④は一様分布と集中分布に対応するようにフェルミ関数+ローレンツ関数を導入した。ここで、 $f(x)$ は深さ $x$ における放射能濃度である。測定された深度分布を 4 種類の分布関数全てで Fitting 解析を行った。測定結果 Fig. 5 に対して、最も再現性の良い Fitting 結果を Fig. 6 に示す。

① 指数関数

$$f(x) = a \exp(-bx)$$

② ローレンツ関数

$$f(x) = \frac{a}{(x-b)^2 + c^2}$$

③ フェルミ関数

$$f(x) = \frac{a}{1 + \exp\left(\frac{x-b}{c}\right)}$$

④ フェルミ関数+ローレンツ関数

$$f(x) = \frac{a}{1 + \exp\left(\frac{x-b}{c}\right)} + \frac{d}{(x-e)^2 + f^2}$$

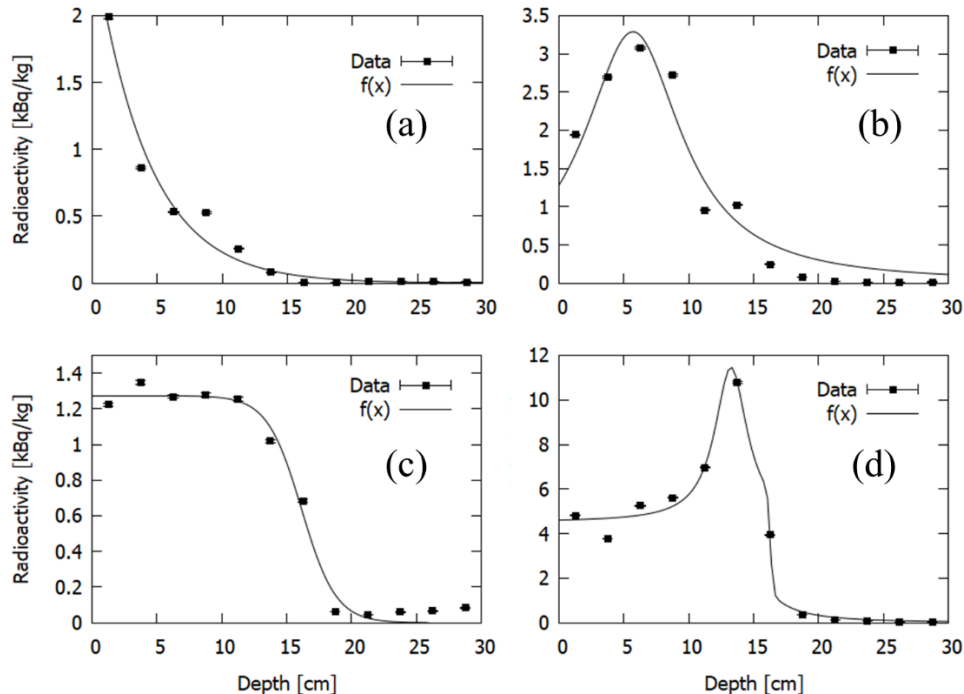


Fig. 6 分布関数による深度分布の Fitting 結果

(a)～(d)の分布に対し①～④の関数で Fitting を行い、最も適した分布関数による Fitting 結果を示した。



決定係数及び作成したグラフの視覚に基づいた評価によって、最も適した分布関数を決定した。測定した全ての深度分布を4種類の分布関数に分類した結果を Fig. 7 に示す。

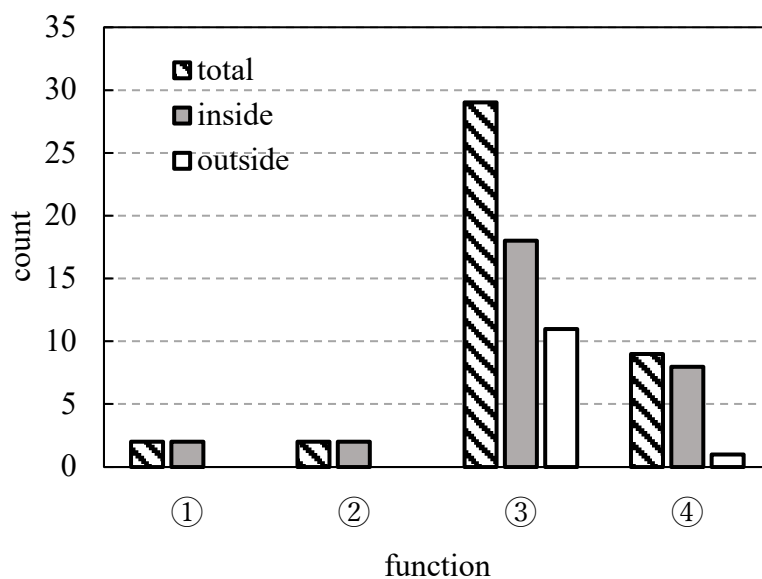


Fig. 7 深度分布の分類結果

Fig. 7 より、圃場内の土壌中放射性セシウムの深度分布は多くの場合、フェルミ関数で表現できることが確認できた。また、帰還困難区域の内側（inside）と外側（outside）で比較すると、外側に比べて内側では深度分布が多様化していることが確認できた。多様化の原因としては、帰還困難区域の外側に比べて内側では、耕耘回数が少ないことが考えられる。

## 5. CsI 検出器を用いた圃場における放射能測定

### 5.1. CsI 検出器

圃場内で土壌から放出される  $\gamma$  線エネルギースペクトルをその場測定するために、CsI 測定モジュール (C12137-01, 浜松ホトニクス社製) を用いた。この検出器モジュールは、シンチレータ (CsI) と Multi-pixel photon counter (MPPC) により、放射性物質からの  $\gamma$  線を検出する検出器である。入射した  $\gamma$  線を CsI にて可視光に変換し、MPPC で極微弱な光を増幅して検出し、 $\gamma$  線のエネルギーを計測することが可能である。また、測定面 (Fig. 8 では上方) 以外の方向からの  $\gamma$  線を遮蔽するために、検出器の測定面以外を覆うように 10 mm 厚の鉛を取り付けた。

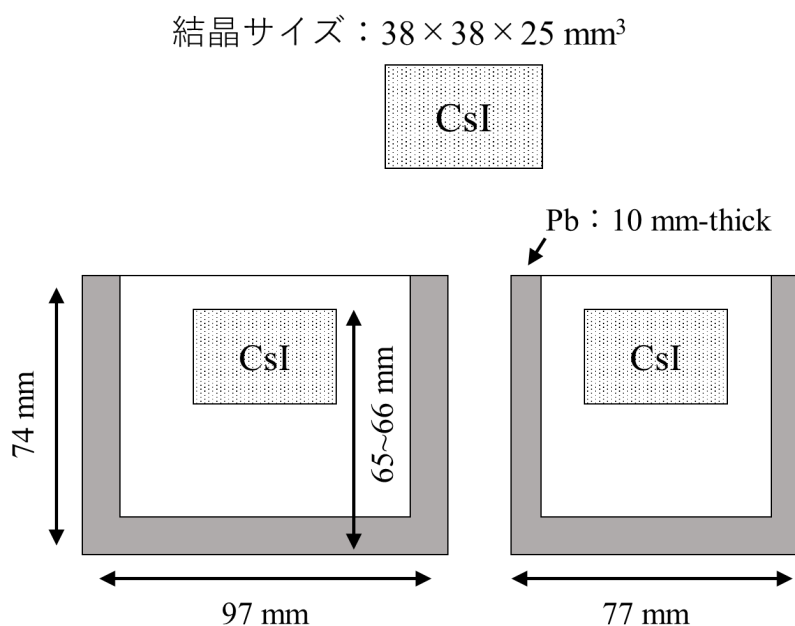


Fig. 8 CsI 検出器

### 5.2. CsI 検出器を用いた地表での放射能測定

土壌採取を行った場所で CsI 検出器を用いた地表での放射能測定を行った。下方からの  $\gamma$  線を検出するために、CsI 検出器の測定面を下向きにして地表に設置し 300 秒間  $\gamma$  線の測定を行った。得られた  $\gamma$  線エネルギースペクトルに対し、ピーク領域とコンプトン領域の解析を行いコンプトン比  $R_C$  を算出する。以下ではそれぞれの算出法について記述する。

### 5.2.1. スペクトル解析～ピーク解析～

CsI 検出器で得られたスペクトルでは、Fig. 9 のように 604 keV( $^{134}\text{Cs}$ )と 662 keV( $^{137}\text{Cs}$ )のピークが重なって観測される。両者の分離が困難なため、604 keV 成分の Net 値を 795 keV( $^{134}\text{Cs}$ )成分の Net 値から推測して差し引くことで 662 keV の Net 値のみを算出する。この算出法を式(3)に示す。式中の定数 (1.1452)は  $^{134}\text{Cs}$  から放出される 604 keV と 795 keV の  $\gamma$  線放出率の比によって算出した。

$$\begin{aligned} Net_{Peak} &= Net_{662\text{ keV}} + Net_{604\text{ keV}} \\ Net_{662\text{ keV}} &= Net_{Peak} - Net_{604\text{ keV}} \\ Net_{662\text{ keV}} &= Net_{Peak} - (Net_{795\text{ keV}} \times 1.1452) \end{aligned} \quad (3)$$

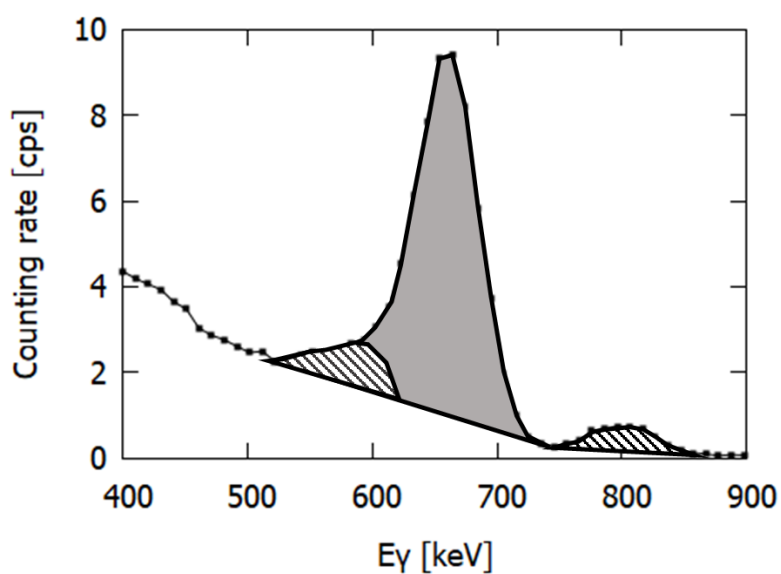


Fig. 9 地表の放射能測定で得られたスペクトル

### 5.2.2. スペクトル解析～コンプトン解析～

コンプトン領域の Net 値を算出するために、コンプトン領域を 100 keV ～ 500 keV と定義した。コンプトン領域の Net 値はコンプトン領域を積算した Gross 値 (Fig. 10 中のⒶ) から、 $^{137}\text{Cs}$  以外の核種から放出される  $\gamma$  線によるコンプトン散乱の影響を BG 値 (Fig. 10 中の斜線部) として差し引くことで算出した。BG 値は土壌中の  $^{40}\text{K}$  由来であると仮定し、 $^{40}\text{K}$  の光電ピーク(1461 keV)の Net 値から推測した。算出法を式(4)に示す。 $^{40}\text{K}$  の光電ピーク(1461 keV)の Net 値から BG 値を求める式については、付録に記載する。

$$Net_{compton} = Gross_{compton} - BG_{compton} \quad (4)$$

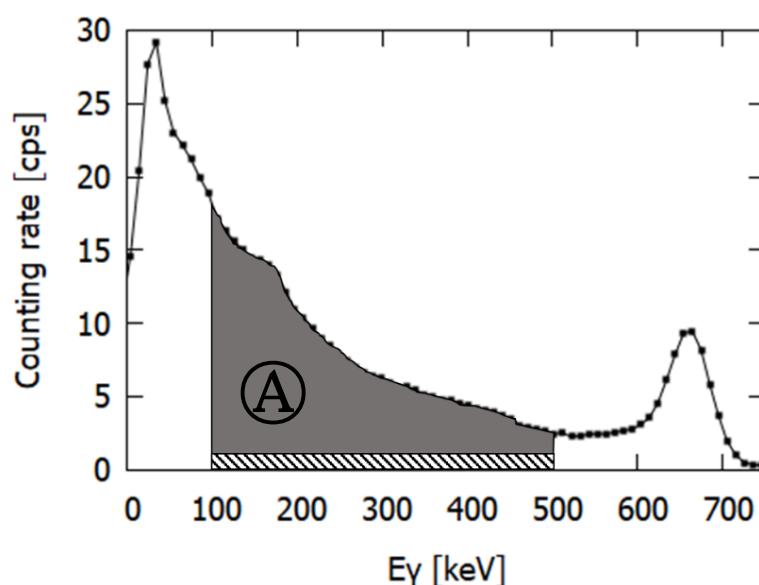


Fig. 10 地表の放射能測定で得られたスペクトル

5.2.1、5.2.2. で算出したピーク領域の Net 値及びコンプトン領域の Net 値から、2.2.で導入したコンプトン比  $R_c$  を式(1)にて算出した。

## 6. 考察

### 6.1. 地表での放射能測定と深度分布の相関

CsI 検出器による地表での放射能測定と Ge 検出器で求めた深度分布の関係を調べる。地表での放射能測定で得たエネルギースペクトルの特徴量として 2.2. で定義したコンプトン比を用いた。深度分布の特徴量として、以下で説明する半値深さを用いた。

#### 6.1.1. 半値深さ $D_h$

Ge 検出器で求めた深度分布を定量的に評価するために、半値深さ  $D_h$  を Fig. 11 の斜線部の面積が全体の面積(全深度に渡る放射能濃度の積算値に対応)に対し半分になる深さと定義した。算出方法としては式(5)のように計算を行った。ただし、実際のデータは離散的であるため、詳細な深さについては半値深さ付近の放射能濃度を使用した比例式を用いて算出した。式中の  $A(x)$  は深さ  $x$  における放射能濃度である。

$$\frac{1}{2} \int_0^{30} A(x) dx = \int_0^{D_h} A(x) dx$$
$$D_h = x_{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

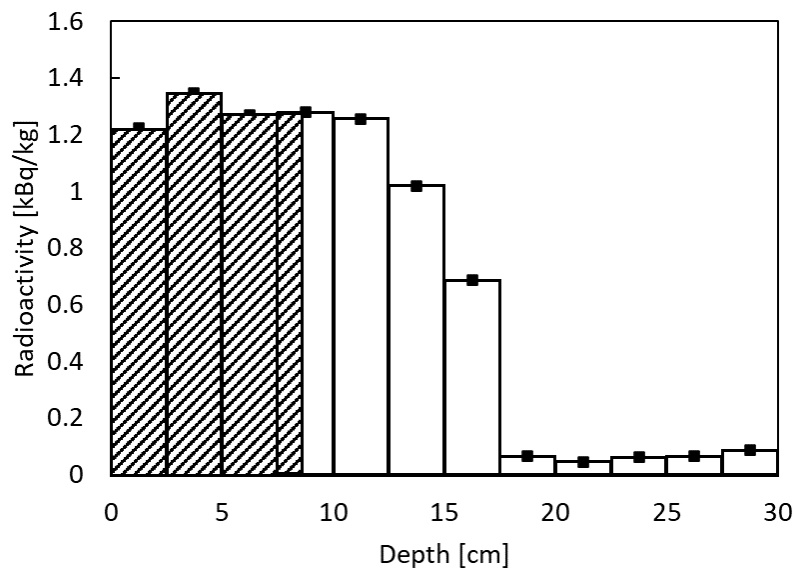


Fig. 11 半値深さの定義

### 6.1.2. コンプトン比と半値深さの相関

2.2.で定義したコンプトン比と、6.1.1.で定義した半値深さの相関を Fig. 12 に示した。

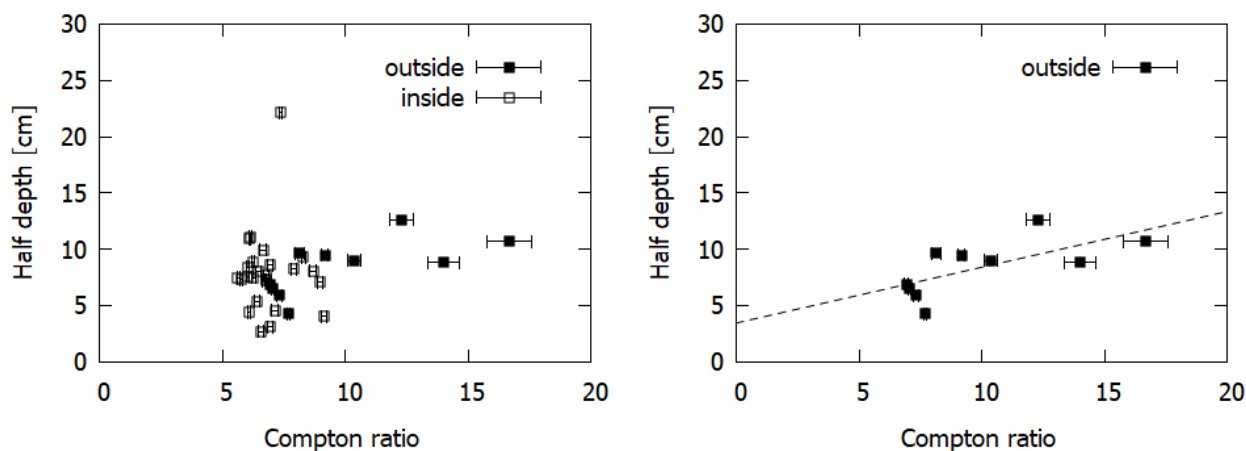


Fig. 12 コンプトン比と半値深さの比較結果

Fig. 12 より、測定した全地点としてはコンプトン比と半値深さとの間には相関が得られなかった。したがって、地表での放射能測定から深度分布を推定することが困難であることが確認できた。しかし、帰還困難区域の外側 (Fig. 12 中の outside) だけに注目すると、コンプトン比と半値深さとの間には相関が確認できた。したがって、耕耘回数が多く土壌中の放射性セシウムの深度分布が平均化されて分布関数がフェルミ分布に限定できる場所においては、地表での放射能測定から半値深さを推定することが可能であると考えられる。

## 6.2. 深度分布に基づく地表での放射能測定のコンプトン値の推定

$^{137}\text{Cs}$  の深度分布から地表での放射能測定値への影響を明らかにするために深度分布に基づく地表でのコンプトン値の推定を行った。地表の放射能濃度で規格化した深度分布及び地表での放射能測定のピーク値を用いて、地表で測定されるコンプトン値を推定した。

### 6.2.1. 推定方法

検出器下方の土壌について深さ 2.5 cm ごとの層に分割し、さらに水平方向に  $1 \times 1$  cm のメッシュ状に切り分けた直方体を単位体積とする (Fig. 13 の右図)。その単位体積中の土壌から放出される  $\gamma$  線が検出器でコンプトン値として観測される値を、土壌による遮蔽効果を用いて推定する (Fig. 13 の左図)。単位体積の層に対応する深さの放射能濃度と地表での放射能測定のピーク値と標準線源を用いた実験で得られたコンプトン比から単位体積におけるコンプトン値を推測し、さらに土壌による遮蔽効果を指数関数で近似することで単位体積ごとの地表での放射能測定のコンプトン値として推算した。この計算を検出範囲内の全単位体積について実施し、それらを総和することで地表での放射能測定のコンプトン値を推定した。総和の際には単位体積を規格化して計算を行った。以上の推定方法を式(6)に示した。推定の際には計算の簡略化のために以下の条件を仮定した。

- (1) 放射性物質の深度分布は水平方向に一様
- (2) 土壌密度は場所や深度によらず一様
- (3) 検出器の検出角度は検出面の法線に対して $\pm 60^\circ$  以内
- (4)  $\gamma$  線の土壌による遮蔽効果は標準線源を用いた実測値を使用
- (5) 土壌遮蔽効果は直線距離で決定
- (6) 単位体積の形状は一定

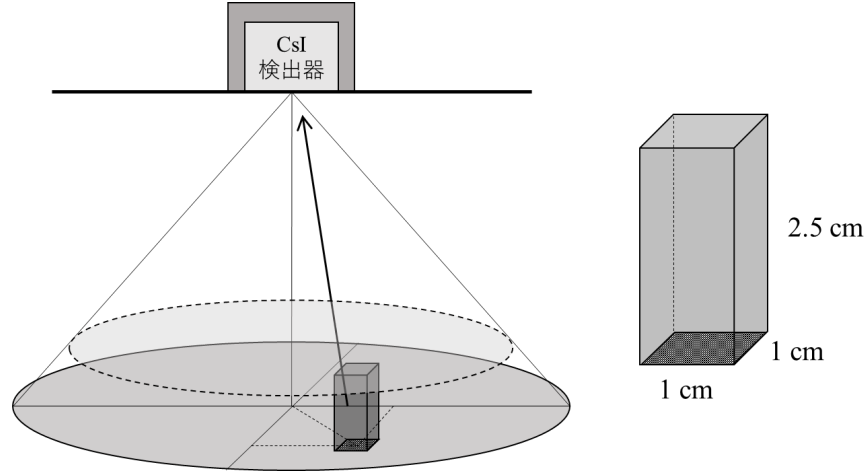


Fig. 13 推定方法の概念図

$$y = N \times R_c \sum_{k=0}^{30} \frac{V_0}{V_k} A_k \sum_{i=-r_k}^{r_k} \sum_{j=-r_k}^{r_k} \begin{cases} \exp\left(-\mu\left(\sqrt{k^2 + (\sqrt{i^2 + j^2})^2}\right)\right) & \left((\sqrt{i^2 + j^2})^2 \leq r_k\right) \\ 0 & \left((\sqrt{i^2 + j^2})^2 > r_k\right) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{pmatrix} k = 0, 2.5, \dots, 30 \\ i = -r_k, -r_k + 1, \dots, 0, \dots, r_k \\ j = -r_k, -r_k + 1, \dots, 0, \dots, r_k \end{pmatrix}$$

$N$  は地表での放射能測定のパーク領域の計数率 [cps]、 $R_c$  は標準線源を用いた実験で得られたコンプトン比、 $V_0$  は単位体積 [ $\text{cm}^3$ ]、 $V_k$  は深さ  $k$  における検出範囲全ての単位体積の総和 [ $\text{cm}^3$ ]、 $A_k$  は地表の放射能濃度で規格化した深さ  $k$  における放射能濃度、 $\mu$  は標準線源を用いた実験で得られた土壌の遮蔽係数、 $r_k$  は深さ  $k$  における底面の半径 [cm] である。

### 6.2.2. 推定結果

地表での放射能測定によるコンプトン値について、の実測値と推定値を比較した結果を Fig. 14 に示す。

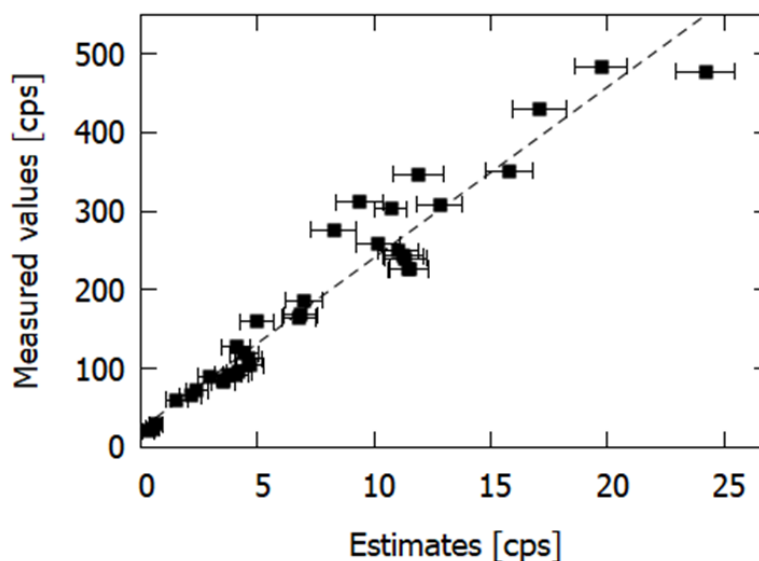


Fig. 14 地表測定コンプトン値の実測値と推定値の比較

この結果から、地表での放射能測定コンプトン値の実測値と推定値の間には強い相関があることが確認できた。したがって、地表の放射能濃度で規格化した深度分布及び地表での放射能測定のピーク値から地表での放射能測定のコンプトン値を推定可能であり、その推定精度が±15%程度となることが確認できた。

## 7. 結論

### 7.1. 水稻圃場における放射性セシウムの深度分布

本研究で求めた圃場内の深度分布は、分布関数によって4種類に分類することができた。分類した結果から、人的介入のない土壌を対象とした先行研究の結果とは異なり、耕耘などの人的介入がある水稻圃場では、放射性セシウムの深度分布は多くはフェルミ関数により表現できることが確認できた。しかし、帰還困難区域の内側では、深度分布は多様化していることが確認できた。深度分布の多様性の違いは耕耘などによる土壌の攪拌・平均化の違いが要因であると考えられる。

### 7.2. 地表での放射能測定による深度分布の推定

帰還困難区域の外側の圃場においては、地表での放射能測定から求めたコンプトン比と深度分布から求めた半値深さの間には相関が確認できた。この結果から、耕耘回数が多く深度分布が平均化している場所においては、地表での放射能測定から深度分布の特徴量である半値深さを推定することが可能であると考えられる。しかし、帰還困難区域の内側などの耕耘回数が少なく深度分布が多様化している場所を含めると地表での放射能測定と深度分布の間には相関が確認できなかった。



### 7.3. 深度分布に基づく地表でのコンプトン値の推定

地表の濃度で規格化した深度分布及び地表で測定したピーク値から地表で測定したコンプトン値を推定することができた。この結果を用いることで、あらかじめ準備した 4 つの分布に対して、地表での放射能測定で得られたピーク値を用いて地表での放射能測定のコンプトン値をそれぞれ推定し、最も実測値に近い分布をその場所の深度分布として推定できることが期待される。

## 8. 謝辞

福島県水稲圃場での測定・土壌採取など協力してくださった京都大学の谷垣氏及び福島農業総合センターの齋藤氏を中心とする関係者の皆様に感謝申し上げます。また、百田准教授をはじめとする研究室の皆様に感謝申し上げます。

## 9. 参考文献

- [1]. GPS 連動型放射線自動計測システム KURAMA

[GPS 連動型放射線自動計測システム KURAMA \(kyoto-u.ac.jp\)](http://www.kyoto-u.ac.jp/~kurama/)

- [2]. U. Hillmann, W. Schimmack, P. Jacob, K. Bunzl, *Radioat. Environ. Biophys.* 1996, 35, 297-303.

- [3]. K. Ochi, Y. Urabe, T. Yamada, Y. Sanada, *Anal. Chem.* 2018, 90, 10795-10802.

- [4]. 「平成 31 年度東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約（受託研究）」（福島マップ事業対応部門横断グループ）

以下に、本文中には引用してない参考文献について記載する。

- [5].  $\gamma$  線の基礎知識

三枝 健二, 入船 寅二, 福士 政広, 齋藤 秀敏, 中谷 儀一郎; 放射線基礎測定学

- [6]. Peak-to-Valley 法

F. Gering, U. Hillmann, P. Jacob, G. Fehrenbacher, *Radioat. Environ. Biophys* 1998, 37, 283-291.

- [7]. 放射性セシウムの土壌中深度分布

T. Ohno, Y. Muramatsu, Y. Miura, K. Oda, *Geochemical Journal*, 2012, 46, 287, 295.

# 付録

○ 調査圃場の情報 ; 個人情報のため公開版では削除)

採取日時、地域、GPS、採取箇所

採取日	地域	帰還困難区域	採取数	GPS	備考
-----	----	--------	-----	-----	----

○ 計数効率 $\eta$ 、 $\gamma$ 線放出率

以下の式で求める計数効率 $\eta$ は U-8 容器を基準としている。したがって、本研究で使用している U-9 容器では補正值 $a$ を用いて補正している。

$$\eta = 1.790 \times E_{\gamma}^{-0.7513}$$

$$a = \begin{cases} k_0 - 20 k_1 + k_1 x & (x > 20) \\ k_0 - 20 k_1 + k_1 x + k_2 (x - 20)^2 & (x \leq 20) \end{cases}$$

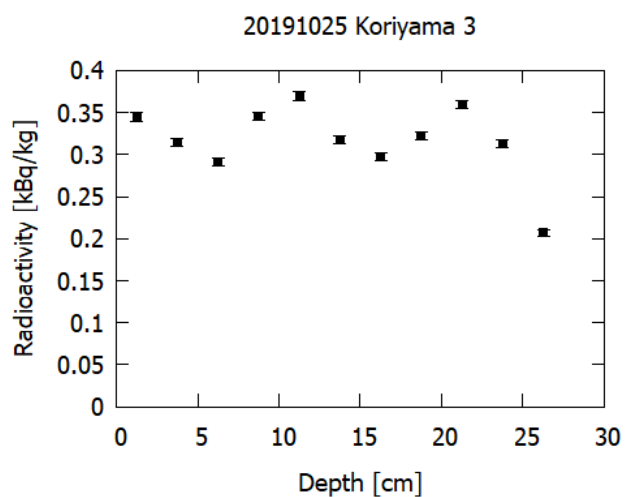
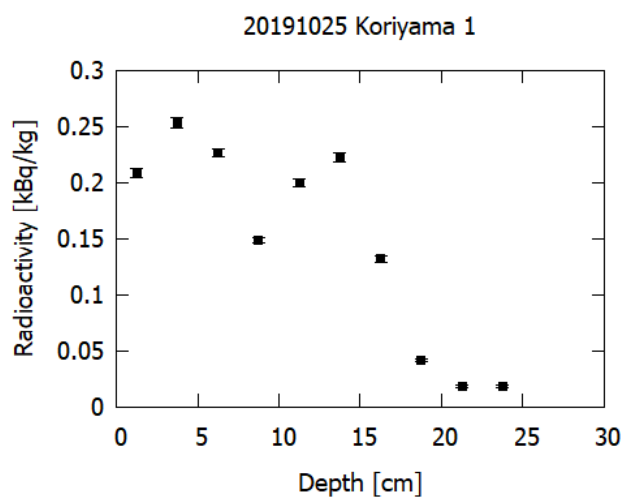
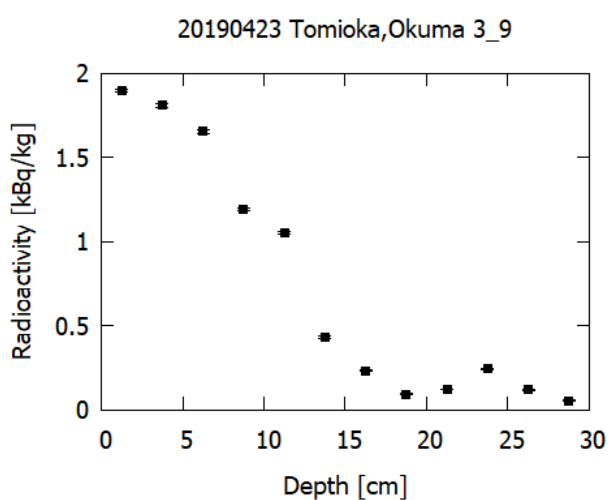
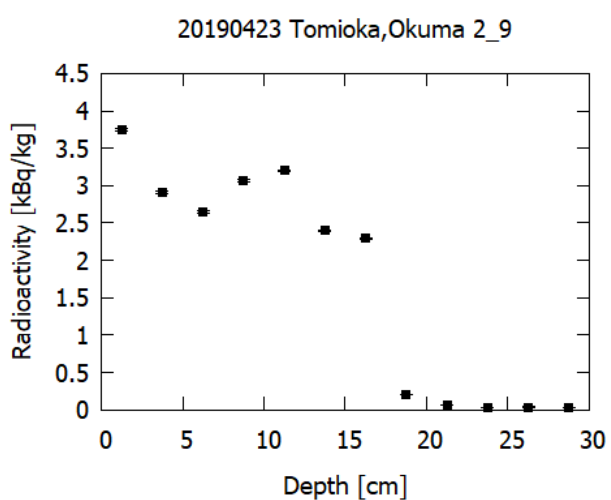
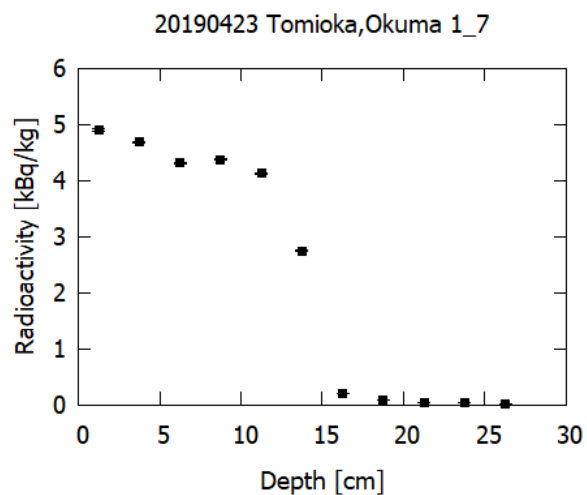
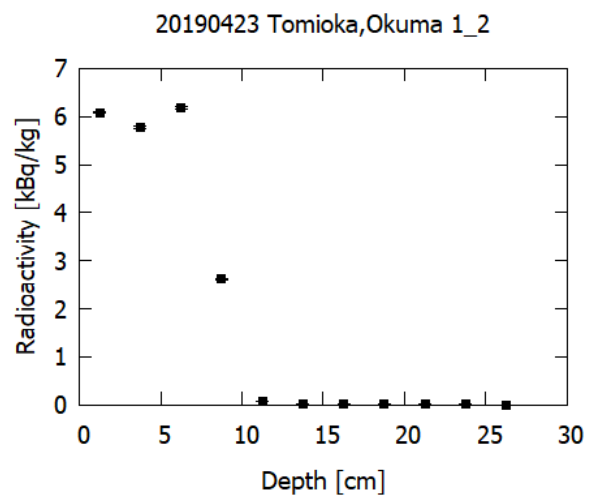
$E_{\gamma}$  :  $\gamma$  線エネルギー [kBq/kg]

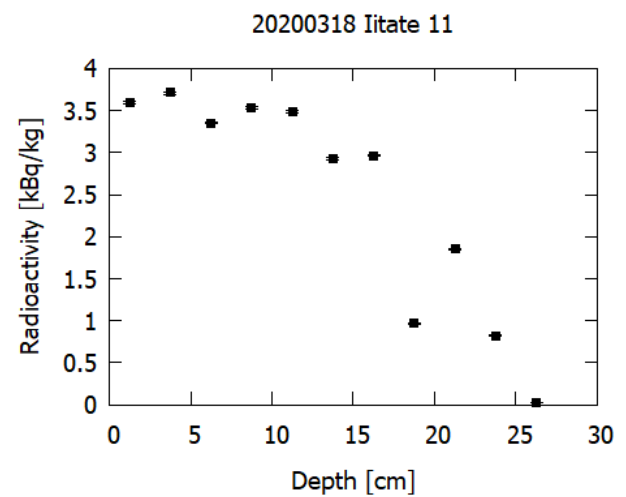
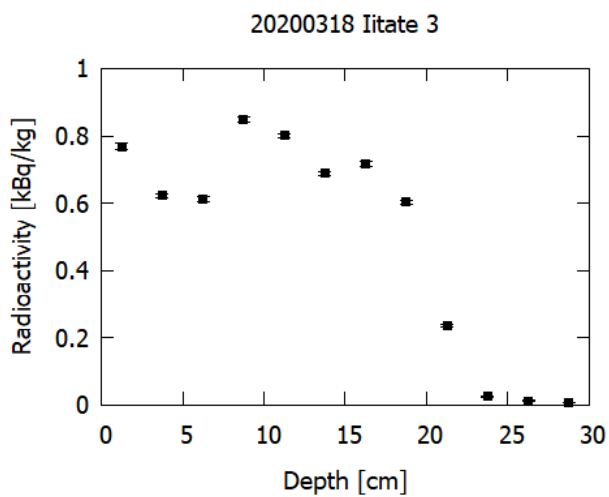
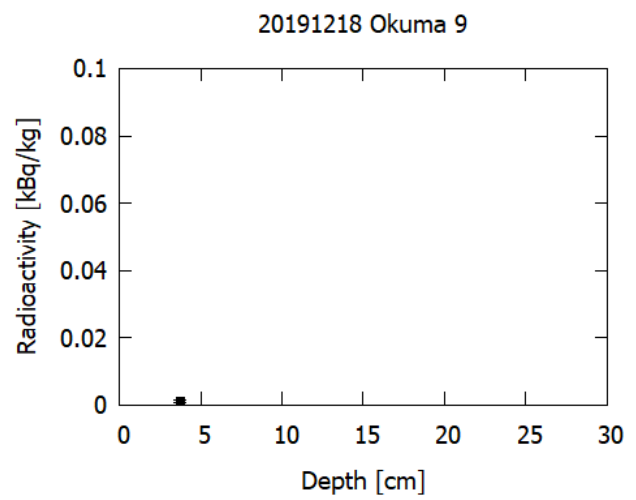
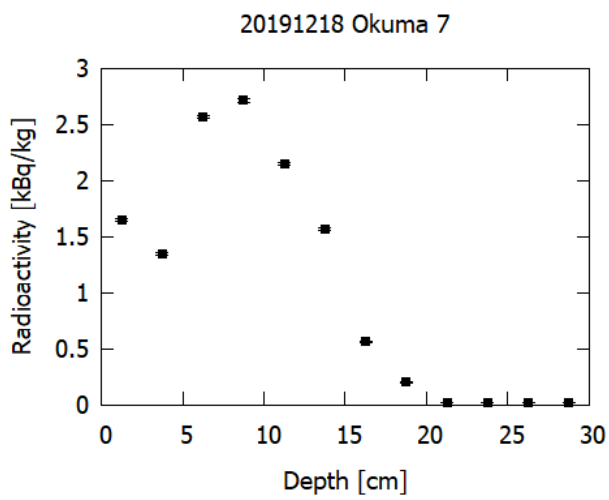
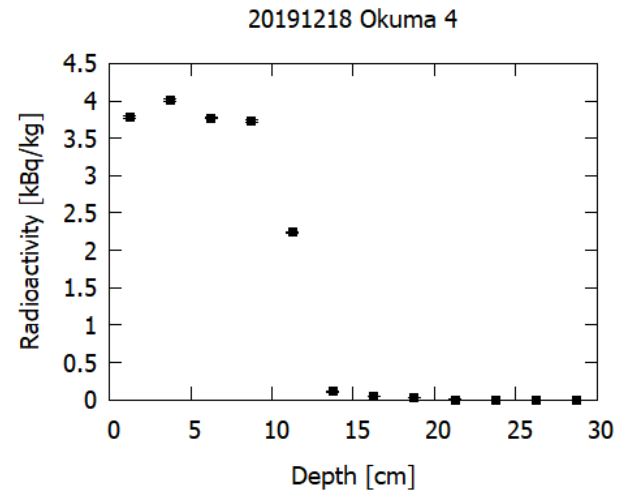
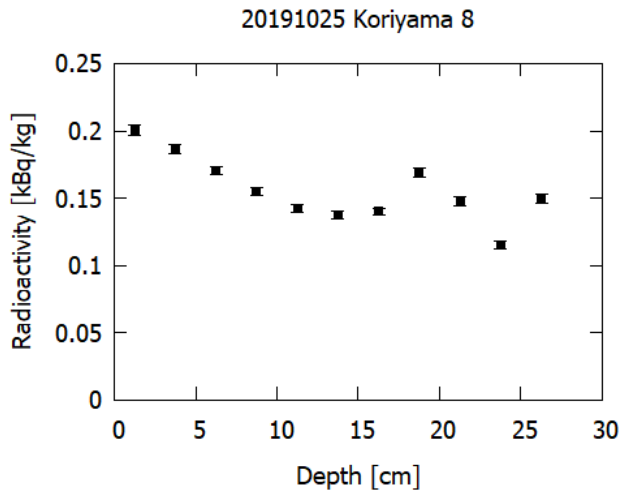
$x$  : 資料高さ [mm]

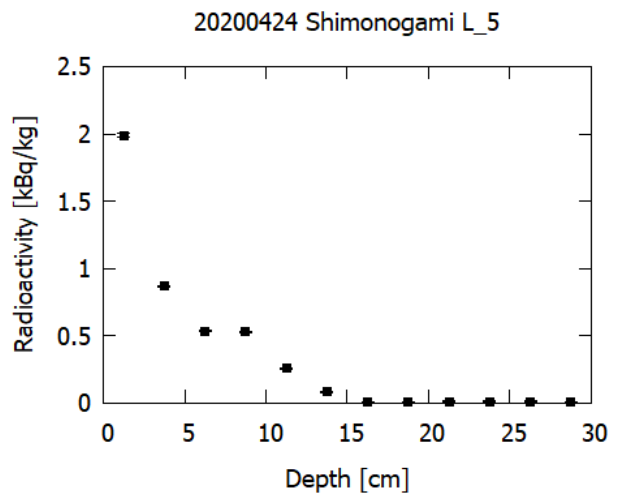
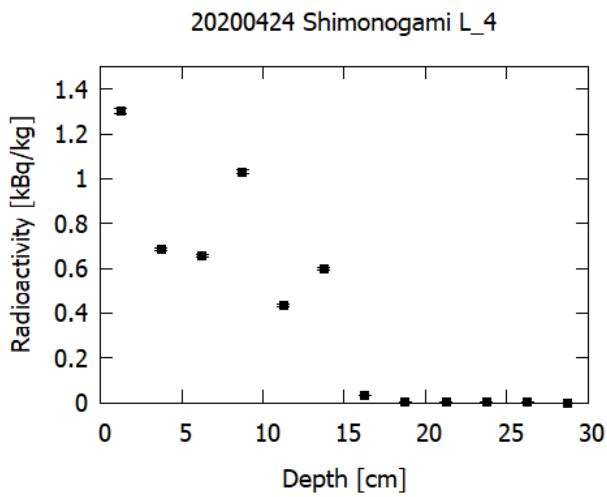
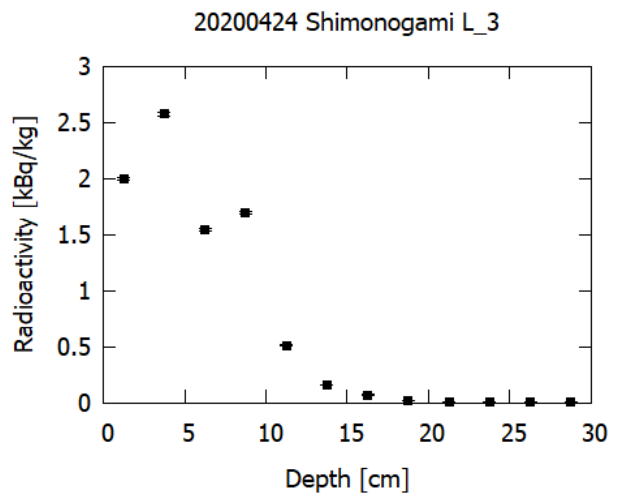
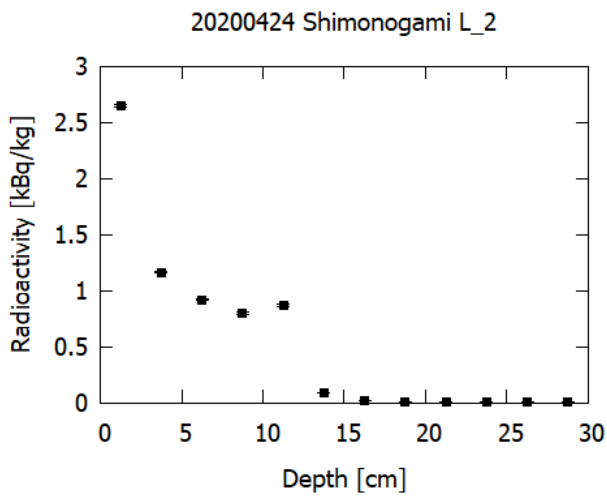
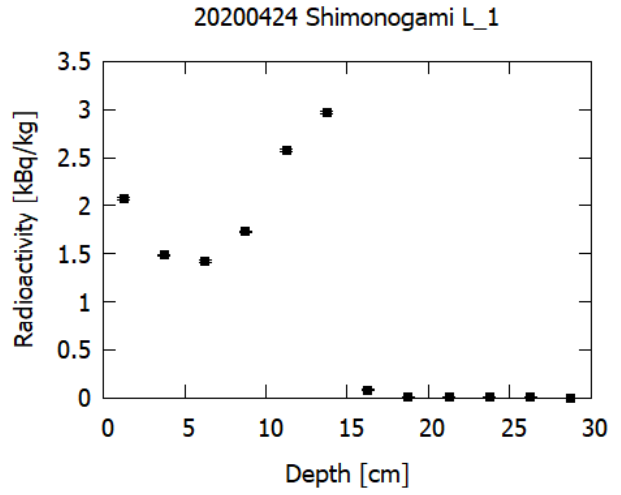
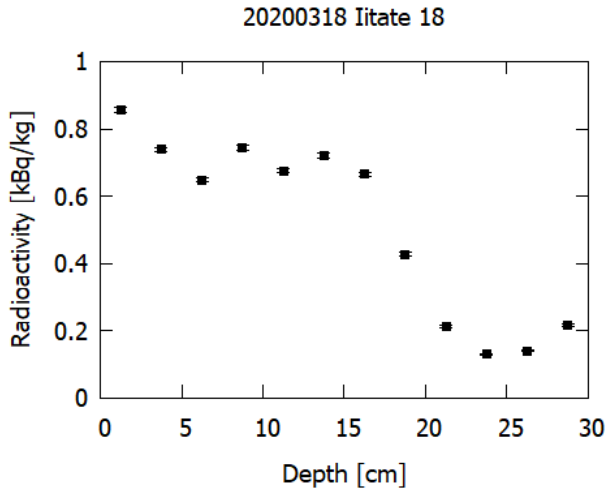
	$k_0$	$k_1$	$k_2$
604 keV	1.700958	-0.023365	0.000973
661 keV	1.801121	-0.026704	0.001467
795 keV	1.735766	-0.024516	0.000859
1461 keV	1.595678	-0.019856	0.000986

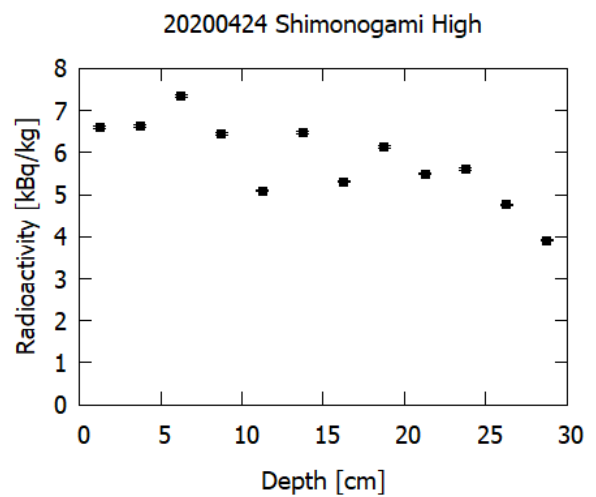
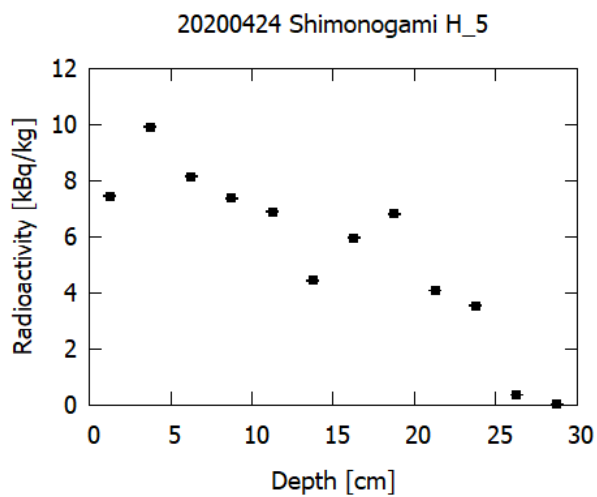
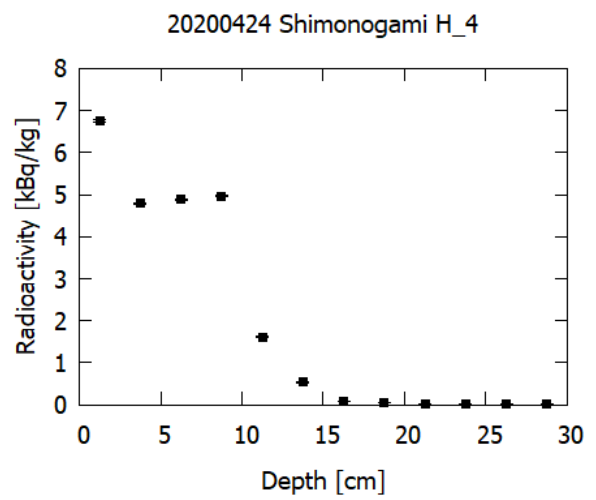
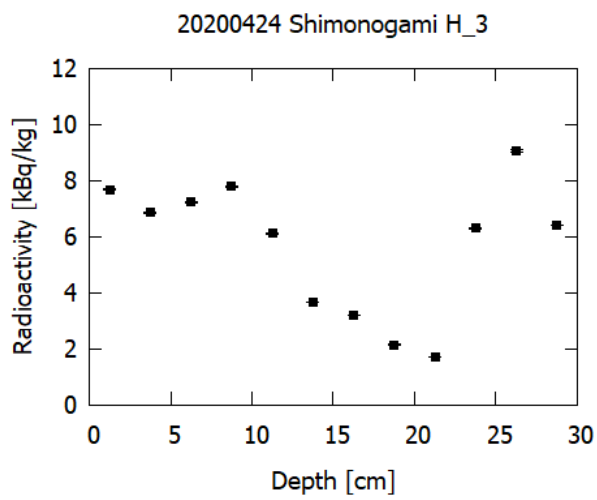
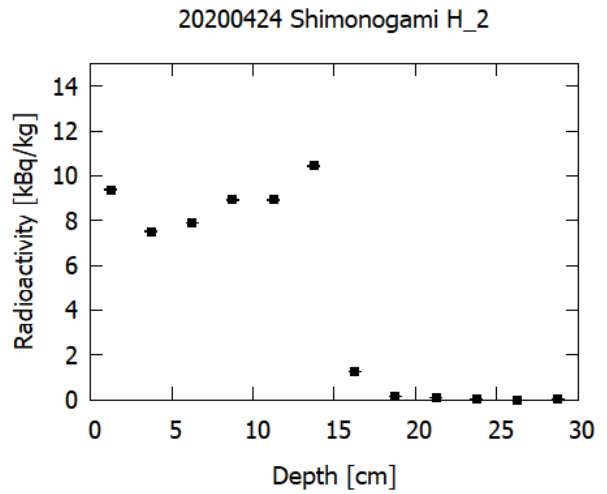
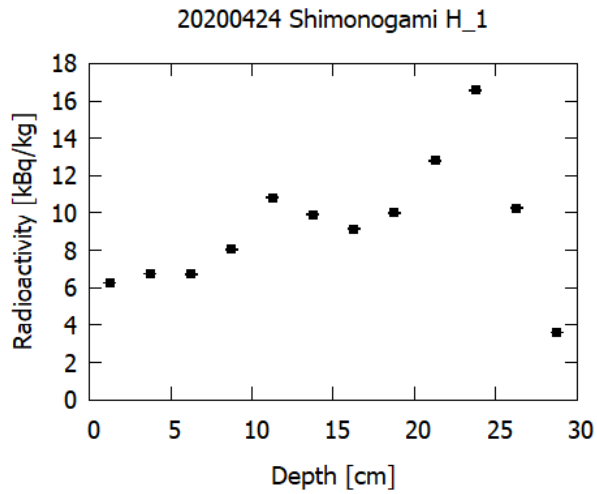
	$\gamma$ 線放出率
604 keV	0.978
661 keV	0.852
795 keV	0.854
1461 keV	0.107

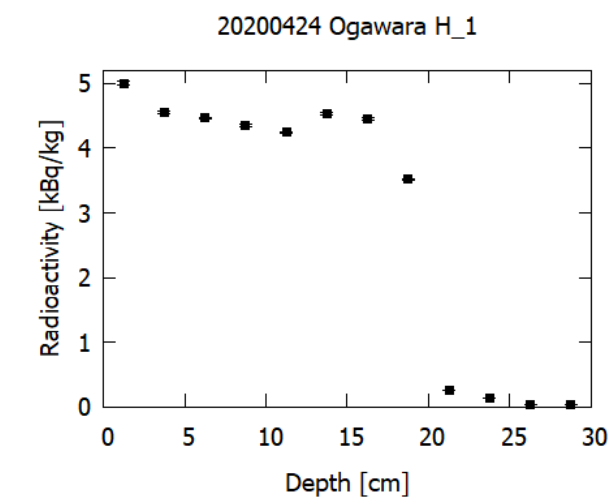
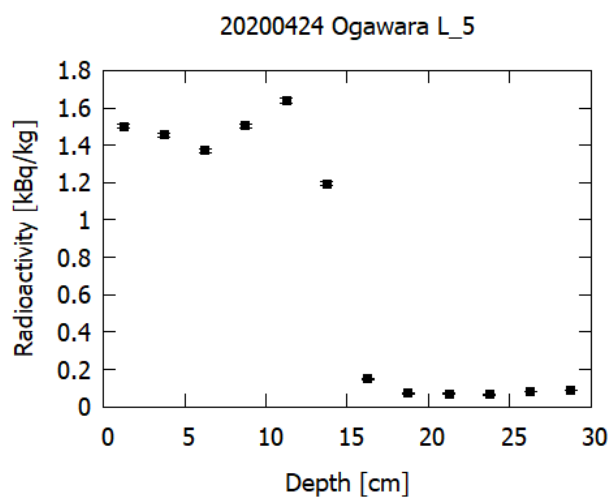
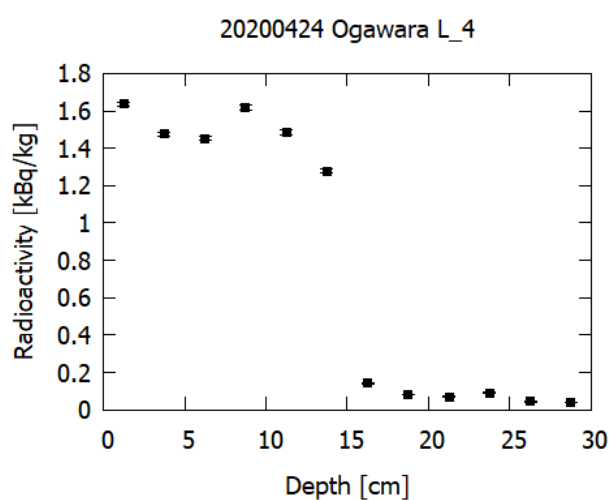
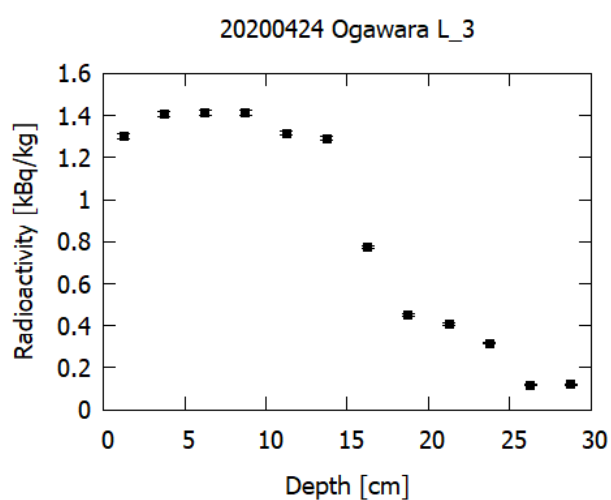
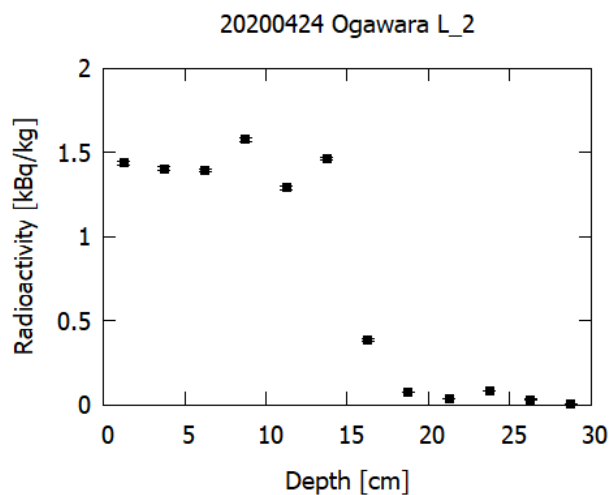
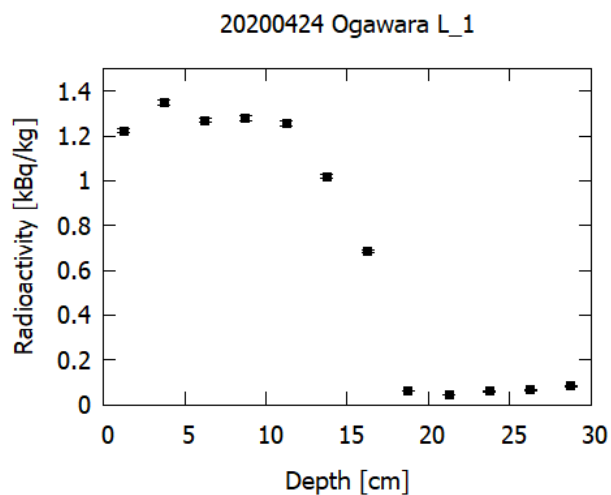
○ 深度分布



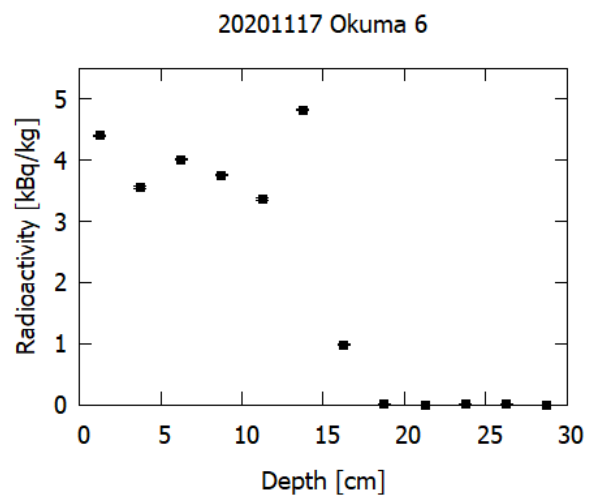
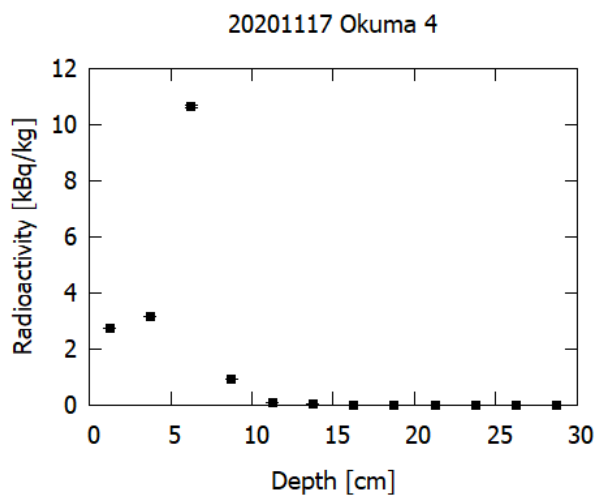
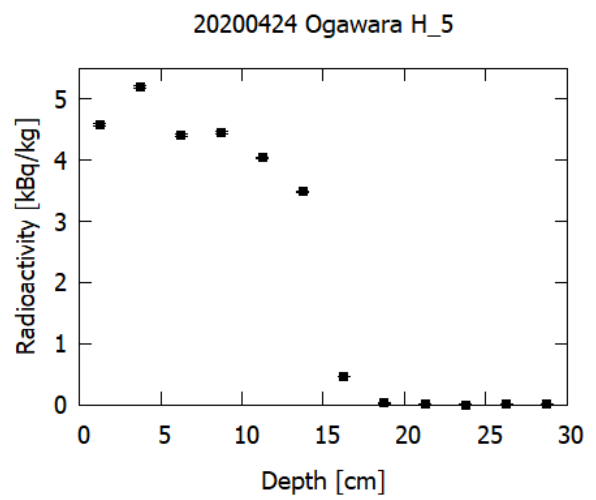
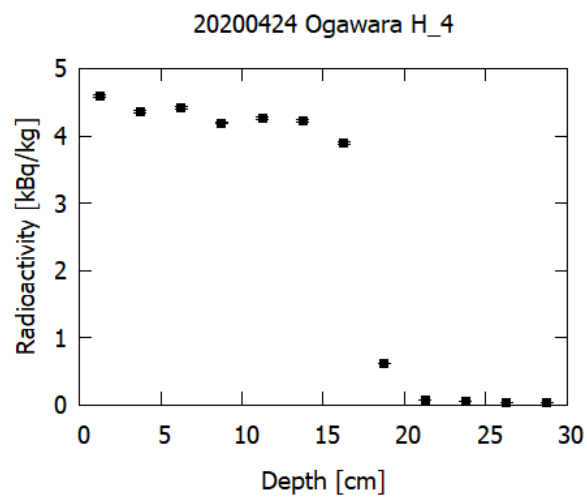
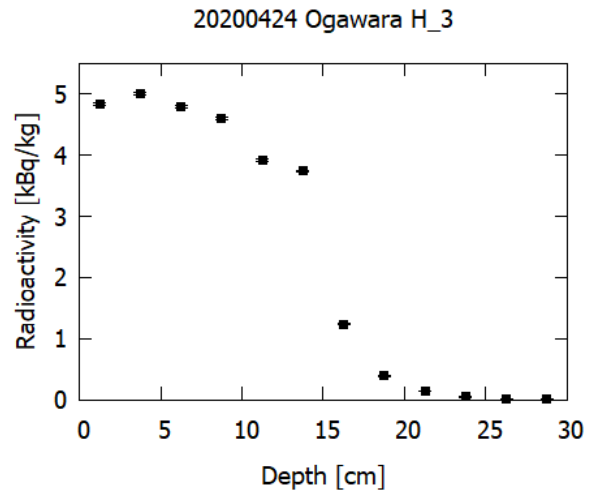
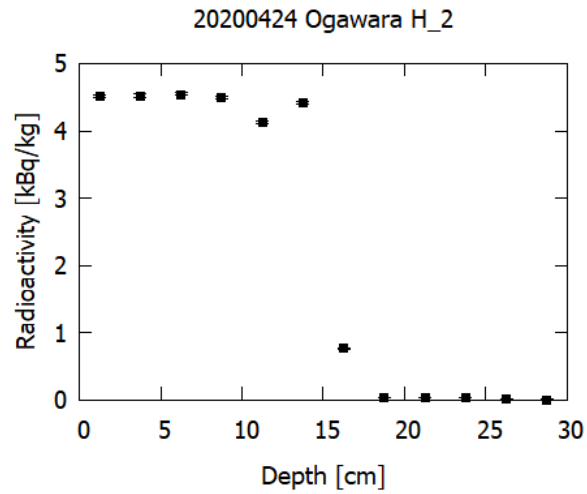


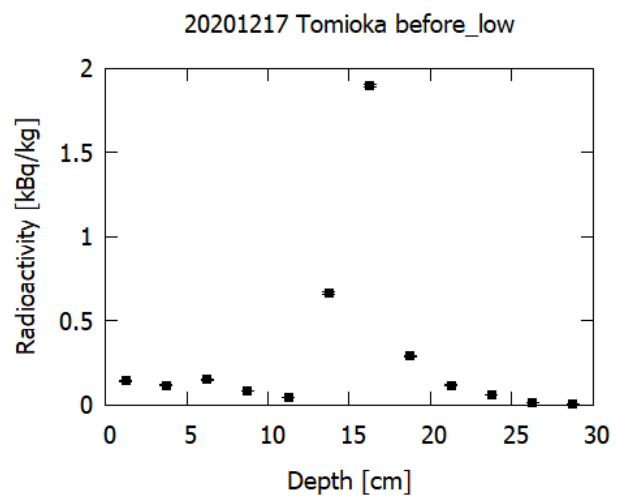
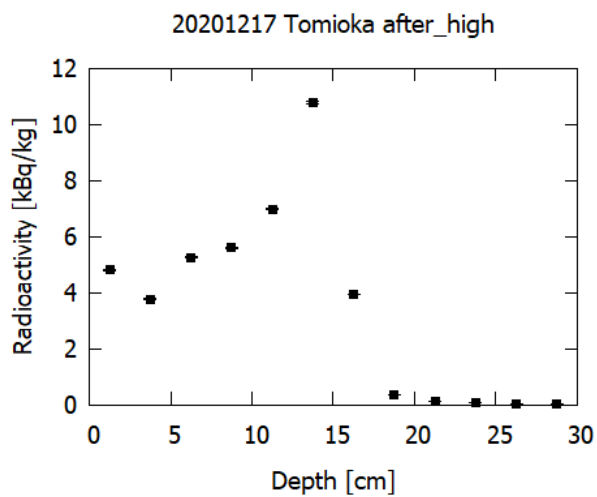
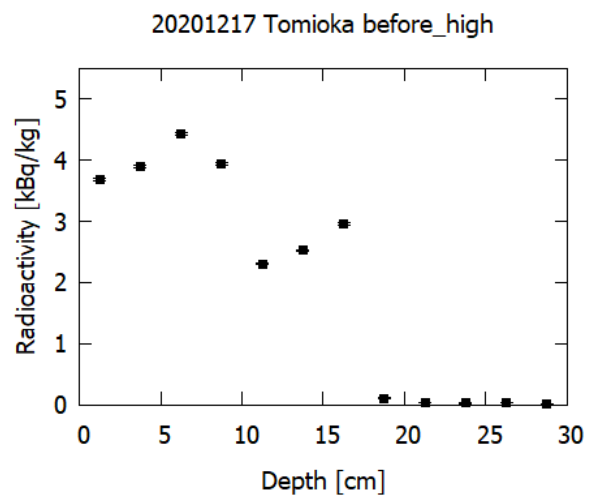
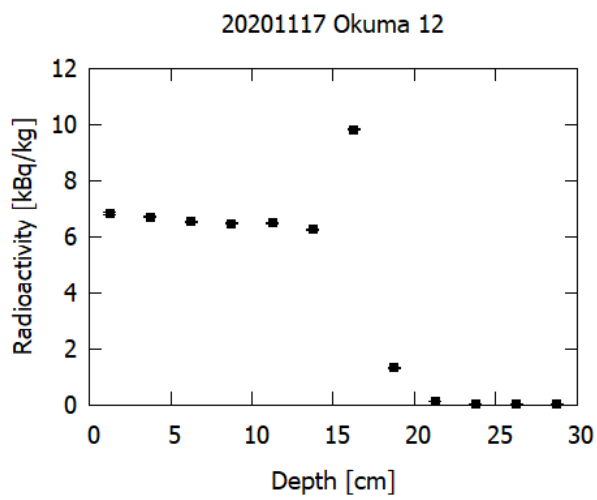
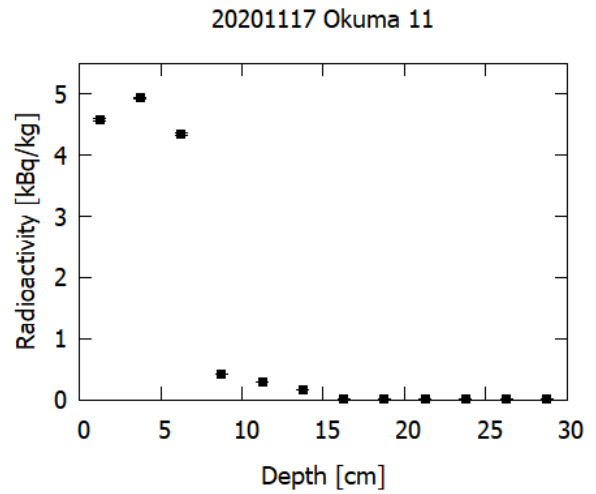
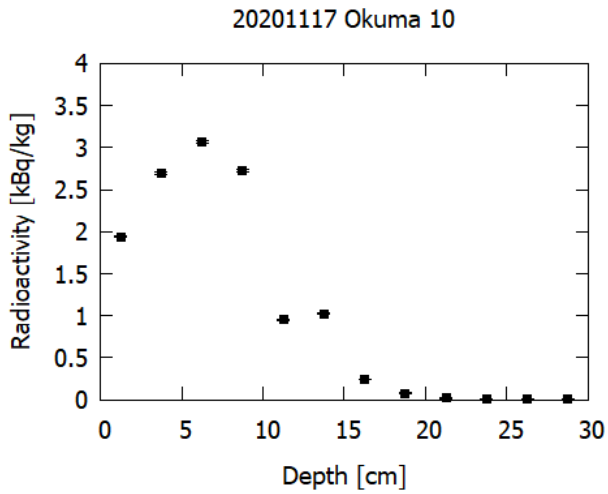


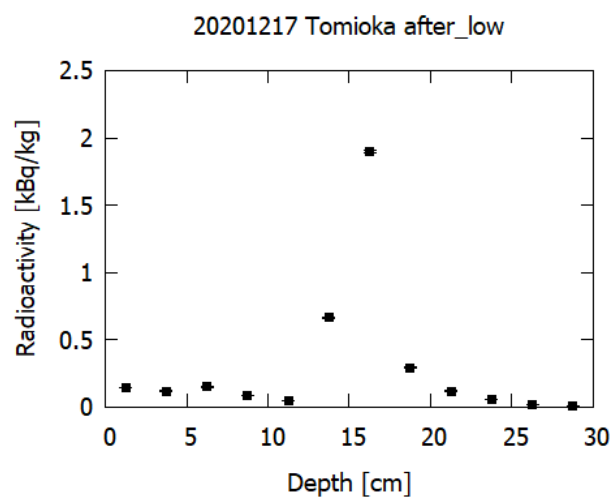










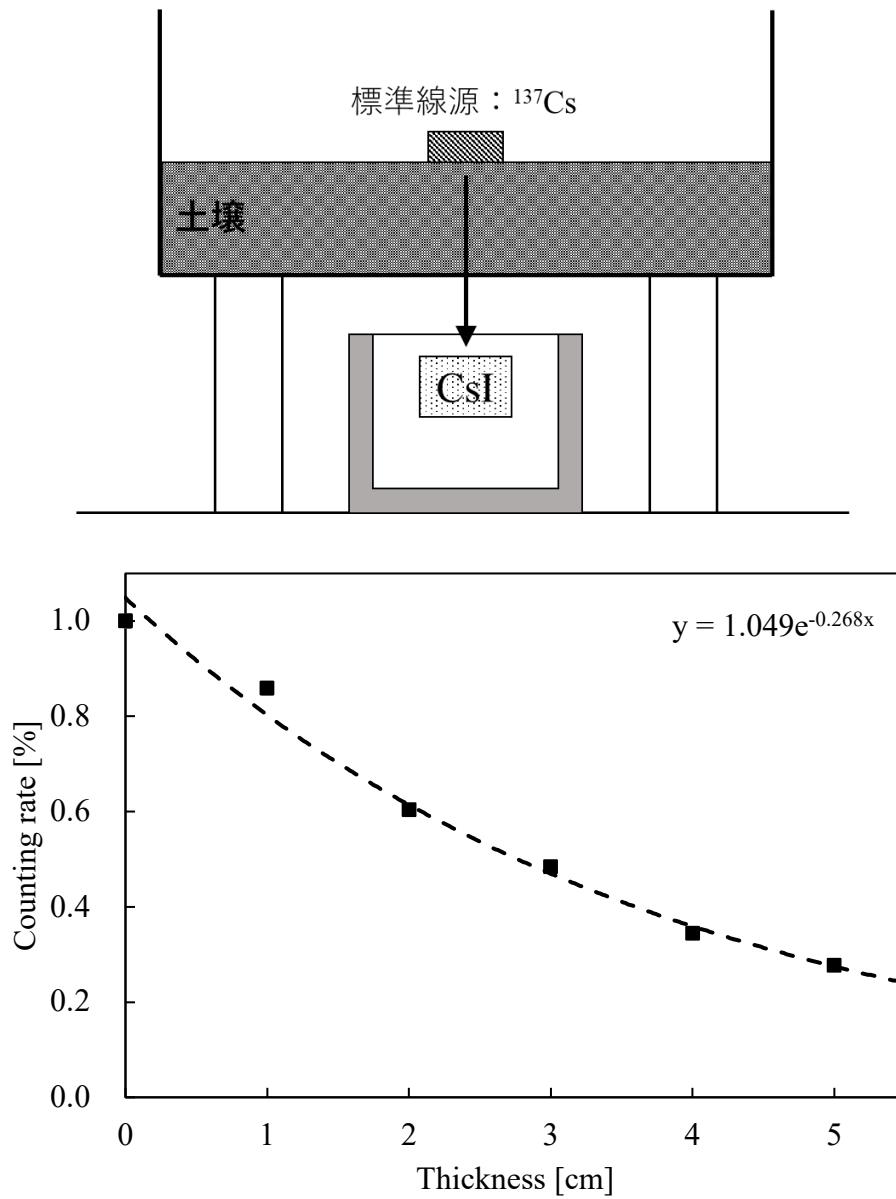


## ○ Fitting 結果

	function	Param_a	Param_b	Param_c	Param_d	Param_e	Param_f	R <sup>2</sup>
20190423 Tom ioka,0 kum a 1_2	fem i	6.018	8.727	0.087				0.999
20190423 Tom ioka,0 kum a 1_7	fem i	4.524	14.066	0.868				0.994
20190423 Tom ioka,0 kum a 2_9	fem i	3.016	17.036	0.775				0.957
20190423 Tom ioka,0 kum a 3_9	fem i	2.005	10.595	3.095				0.981
20191025 Koriyam a 1	fem i	0.211	17.044	1.183				0.935
20191025 Koriyam a 3	fem i	0.328	26.525	0.520				0.945
20191025 Koriyam a 8	fem i	0.156	26.978	0.237				0.793
20191218 0 kum a 4	fem i	3.842	11.477	0.690				0.999
20191218 0 kum a 7	fem i+ lorentz	1.179	15.761	0.556	16.499	8.217	-3.137	0.979
20191218 0 kum a 9								
20200318 Iitate 3	fem i	0.724	20.455	1.055				0.960
20200318 Iitate 11	fem i	3.641	18.913	3.214				0.927
20200318 Iitate 18	fem i	0.768	19.804	3.268				0.906
20200424 Shim onogam iL_1	fem i+ lorentz	1.632	14.956	0.099	1.724	12.614	-0.026	0.981
20200424 Shim onogam iL_2	exp	3.136	0.187					0.929
20200424 Shim onogam iL_3	lorentz	48.947	3.528	4.398				0.932
20200424 Shim onogam iL_4	fem i	0.966	12.599	2.424				0.826
20200424 Shim onogam iL_5	exp	2.598	0.242					0.975
20200424 Shim onogam iH_1	fem i+ lorentz	7.438	26.219	0.092	135.567	24.247	3.858	0.892
20200424 Shim onogam iH_2	fem i	8.843	16.144	0.059				0.976
20200424 Shim onogam iH_3	fem i+ lorentz	7.302	13.760	1.986	102.504	26.440	-3.321	0.943
20200424 Shim onogam iH_4	fem i	5.573	10.478	1.026				0.965
20200424 Shim onogam iH_5	fem i	8.007	20.927	3.971				0.830
20200424 Shim onogam iH igh	fem i	6.814	33.215	8.729				0.681
20200424 0 gaw ara L_1	fem i	1.273	16.145	1.319				0.989
20200424 0 gaw ara L_2	fem i	1.428	16.192	0.059				0.989
20200424 0 gaw ara L_3	fem i	1.435	17.757	3.160				0.965
20200424 0 gaw ara L_4	fem i	1.536	14.786	0.657				0.991
20200424 0 gaw ara L_5	fem i	1.494	14.718	0.679				0.988
20200424 0 gaw ara H_1	fem i	4.521	19.528	0.624				0.993
20200424 0 gaw ara H_2	fem i	4.440	15.703	0.349				0.998
20200424 0 gaw ara H_3	fem i	4.756	15.051	1.450				0.990
20200424 0 gaw ara H_4	fem i	4.343	17.608	0.635				0.998
20200424 0 gaw ara H_5	fem i	4.559	14.621	0.798				0.988
20201117 0 kum a 4	fem i+ lorentz	2.638	8.105	0.633	2.063	5.747	0.000	1.000
20201117 0 kum a 6	fem i	3.988	16.160	0.081				0.968
20201117 0 kum a 10	lorentz	68.174	5.699	4.552				0.953
20201117 0 kum a 11	fem i	4.759	7.505	0.536				0.996
20201117 0 kum a 12	fem i+ lorentz	6.543	17.937	0.578	0.162	16.258	0.212	0.998
20201217 Tom ioka before_high	fem i	3.891	15.731	2.426				0.895
20201217 Tom ioka after_high	fem i+ lorentz	4.518	16.268	0.072	15.851	13.246	-1.510	0.990
20201217 Tom ioka before_low	fem i+ lorentz	0.114	8.670	0.054	2.970	15.607	1.072	0.996
20201217 Tom ioka after_low	fem i+ lorentz	0.095	8.512	0.706	1.287	17.823	1.060	0.983

## ○ 標準線源を用いた実験

6.2.1 で用いた土壌の遮蔽効果は以下の実験から得た実験値を使用した。



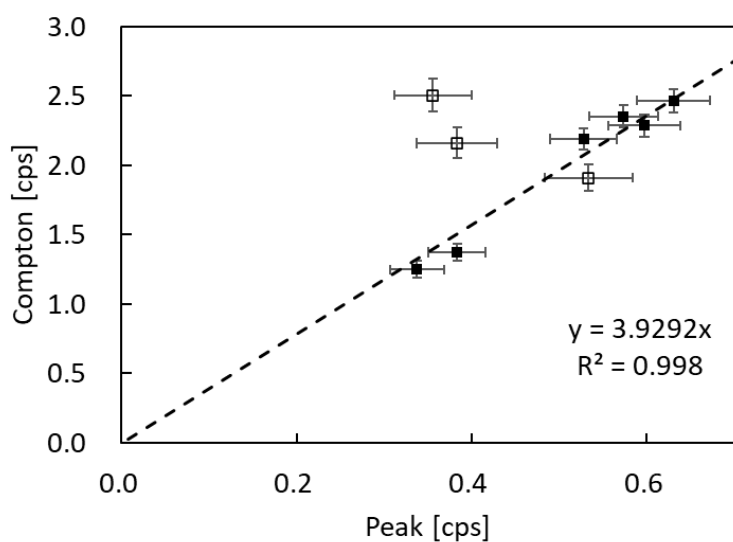
Thickness [cm]	Net	NetE	Rc	RcE	Compton	ComptonE
0	61.40	0.45	0.27	0.00	16.35	0.23
1	44.30	0.38	0.32	0.01	14.04	0.22
2	24.74	0.29	0.40	0.01	9.87	0.18
3	18.06	0.25	0.44	0.01	7.91	0.16
4	11.40	0.19	0.49	0.01	5.62	0.14
5	8.95	0.17	0.51	0.02	4.53	0.12

さらに、0 cm の値で規格化したデータを以下に示す。

Thickness [cm]	Net	NetE	Compton	ComptonE
0	1.00	0.01	1.00	0.01
1	0.72	0.01	0.86	0.01
2	0.40	0.00	0.60	0.01
3	0.29	0.00	0.48	0.01
4	0.19	0.00	0.34	0.01
5	0.15	0.00	0.28	0.01

## ○ $^{40}\text{K}$ から BG の推測

5.2.2. で用いた BG の値は高知県の土壌のデータを使用した。



	Net	NetE	Compton	ComptonE
Kaizuka20161116_1.txt	0.574	0.040	2.353	0.081
Kaizuka20161116_Piint2_1.txt	0.631	0.042	2.467	0.083
Mishima161116_Point1.txt	0.337	0.031	1.250	0.059
Mishima161116_point2.txt	0.383	0.033	1.375	0.062
Soga161116_point1.txt	0.528	0.038	2.192	0.078
Soga161116_point2.txt	0.597	0.041	2.286	0.080
konpira を除外して fitting				
Konpira20151115_point2.txt	0.533	0.050	1.910	0.095
Konpira20161115_1.txt	0.383	0.046	2.161	0.110
Konpira20161115_2.txt	0.356	0.044	2.506	0.118

## ○ グラフデータの保存先

Fig. 1	1120 kBq 10 cm cps.csv
Fig. 2	2022 thesis graph.pptx
Fig. 3	Air dose rate.csv
Fig. 4	2022 thesis graph.pptx
Fig. 5	fit_exp.csv, fit_lorentz.csv, fit_fermi.csv, fit_compton.csv
Fig. 6	fit_exp.csv, fit_lorentz.csv, fit_fermi.csv, fit_compton.csv
Fig. 7	2022 thesis Data.xlsx
Fig. 8	2022 thesis graph.pptx
Fig. 9	20190423 Tomioka, Okuma 1_2.csv
Fig. 10	20190423 Tomioka, Okuma 1_2.csv
Fig. 11	fit_fermi.csv, 2022 thesis graph.pptx
Fig. 12	Rc_Dh.csv
Fig. 13	2022 thesis graph.pptx
Fig. 14	Compton obs_est.csv

その他必要なデータは「2022 thesis Data.xlsx」にまとめて保存した。