

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 8 日現在

機関番号：32689

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K12208

研究課題名(和文)放射性セシウムの土壌沈着深さがわかるガンマ線カメラの開発

研究課題名(英文)A Gamma-ray camera to visualize 3-D distribution of radioactive 137-Cs sources

研究代表者

片岡 淳(Kataoka, Jun)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90334507

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、福島原発事故で飛散した ^{137}Cs 分布の3次元可視化技術を新たに開拓した。具体的には(1)土壌中で散乱した2次ガンマ線と直接ガンマ線の比率(2)散乱ガンマ線画像の広がりの方を用いることで、2次元ガンマ線画像の縮退を解くことができる。シミュレーション及び実験室環境での詳細検証を経て、福島県浪江の森林部においてフィールド試験を行った。 ^{137}Cs が深度方向に指数関数分布をしていると仮定し、緩衝深度 $=2.22 \pm 0.05$ cmを得た。これはスクレーパープレートによる直接調査の結果と良く一致している。今後は SPECT など散乱ガンマ線を用いることで、新たな医療応用も期待できる。

研究成果の概要(英文)：We developed a novel technique to visualize 3-D distribution of gamma-ray sources, particularly the distribution of ^{137}Cs which was released from the Fukushima daiichi plant in 2011. We showed that both (1) an event ratio between the full photo-absorption against Compton scattered events, and (2) image blurring due to scattering, can be an excellent estimator of the source localization in the soil, water and concrete. After detailed investigation based on the simulation and table-top experiments, we conducted number of field tests in the forest of Namie, Fukushima. We found that observed spectra can be well fit with a buffer depth $\beta=2.22 \pm 0.05$ cm, where we assume distribution of ^{137}Cs follows as $\propto \exp(-z/\beta)$. The results is consistent with independent measurements using a scraper plate, confirming the validity of our simple, but non-destructive measurement. We argue that similar approach can be also applicable in the SPECT in which scattered events are usually discarded.

研究分野：放射線イメージング

キーワード：土壌汚染 3D深度分布 散乱ガンマ線 ガンマ線カメラ

1. 研究開始当初の背景

福島第一原発事故を契機に、国内外でガンマ線を可視化する様々な技術（ガンマカメラ）が提案され、一部は既に装置化・製品化されている。一方で、フィールド調査で得られた画像が、妥当性を検証せずに独り歩きしている感も否めない。とくに、通常良く使用されるピンホールカメラではエネルギーの高い¹³⁷Cs (662 keV)や¹³⁴Cs (605keV,796keV)を直接コリメートすることはできず、最大でも200keV 程度までのエネルギーの低いガンマ線にしか適用できない。実際、福島県のフィールドで実測したスペクトルを見ると、これら核種からの直接ガンマ線のほかに膨大な量の散乱ガンマ線 (200keV 以下) の混入が見られる。ピンホールカメラで撮影しているのは主にこの散乱成分であり、本来意図した表層での沈着状況を反映せず、また散乱による画像の劣化（ボケ）が予想される。もう一つのガンマ線可視化技術であるコンプトンカメラはコンプトン散乱の運動学を用いてガンマ線の到来方向を制限するため、重厚なシールドは不要である。200keV 以上でも広い視野と有効面積を実現し、直接ガンマ線のみでイメージを取得することができる。しかしながら、この場合でも図 1 に示すとおり、得られる画像は視線方向に縮退している。一般に、ガンマ線カメラで得られるのは2次元射影のみであり、深さ方向（視線の奥行き方向）の情報は得られない。

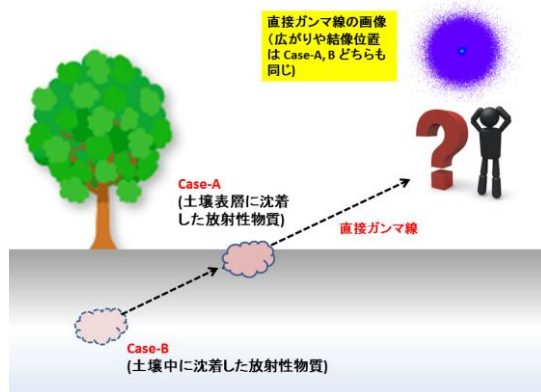


図 1: ガンマ線カメラによる画像の縮退。直接ガンマ線の画像情報だけでは、奥行き方向の情報が得られない

2. 研究の目的

本研究は、この一見混沌とした状況を整理し、土壌中の様々な深さにおける放射線核種の集積状況を「3 次元的に」可視化する新規技術を考案する。さらに、提案した手法の有用性を実機とシミュレーションの双方から検証する。通常、汚染の深度状況を調べるには鉄パイプやスクレーパープレートなど、直接的に土壌をサンプリングするしか方法がない。このため、調査が非常に長時間かつ局所的なものとなり、広域のデータ取得が難しい。新規手法を確立することで初めて非破壊的かつ短時間で深度分布推定が可能になる。

本研究での基本アイデアを図 2 に示す。放射性物質が土壌の表層に沈着しているか、あるいは土壌中で生じているかでスペクトル・画像は大きく異なることが想定される。まず、画像における視線方向（奥行き方向）の縮退を解くため、実験室環境で様々な環境を模擬した実測とシミュレーションにより、直接ガンマ線・散乱ガンマ線の混在比率が深度にどのように依存するかを検証する。また、散乱ガンマ線の画像広がりから、深度分布を推定し、上記と矛盾のないことを調べる。続いて、我々が独自に開発した携帯型コンプトンカメラ（重さ 1.9kg; Kataoka et al. 2013, NIM-A, 732, 403）と新規開発のピンホールカメラを用いて福島浪江町でフィールド試験を行い、既存技術で求めた深度分布と新規手法が一致することを確認する。これにより、除染すべき土壌の厚みを定量化することが可能となり、復興作業への貢献も期待できる。

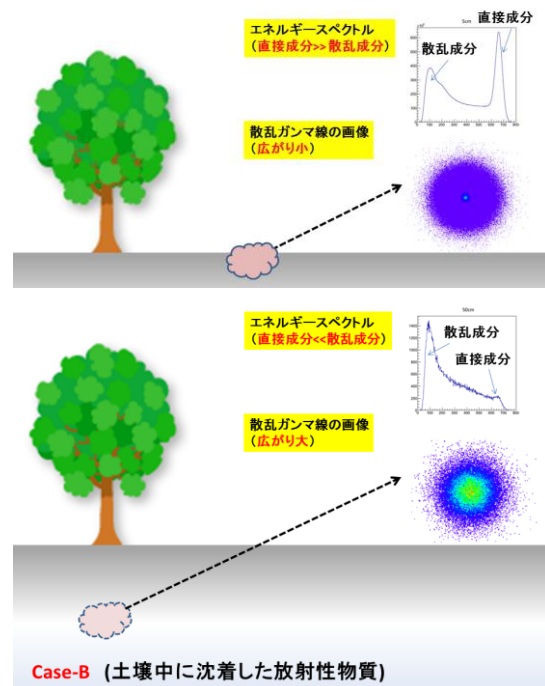


図 2: 本研究の基本的なアイデア。土壌中の深さによって、直接ガンマ線と散乱ガンマ線の比率が異なり、スペクトルおよび画像が共に大きく変化する

3. 研究の方法

平成 27 年度は様々なケースを想定したシミュレーションから土壌深度に対して最も感度の高いパラメータを調査し、これを用いて 3 次元的に深さ方向の縮退を解く手法を確立した。さらに、シミュレーション結果が正しいことを実機で確認するため、散乱ガンマ線 (200keV 以下) に特化した簡易型ピンホールカメラを製作した。カメラの焦点面には高精度シンチレータ (Ce:GAGG) を画像素子として配置し、タングステン製ピンホール・コリメータと組み合わせる簡単かつ安価な構成をとった。平成 28 年度は深度の最適化パラメータを用いて、まずは実験室で「深さ方向」

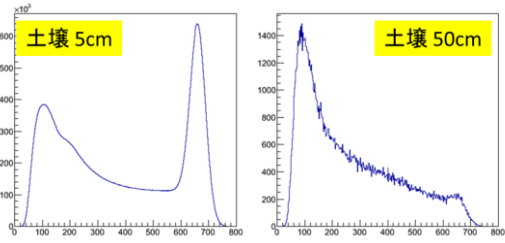


図 3: 土壌中 5cm(左), 50cm (右)に埋め込まれた ^{137}Cs 線源からのスペクトル。深度が大きくなるにつれ、散乱成分が増大する

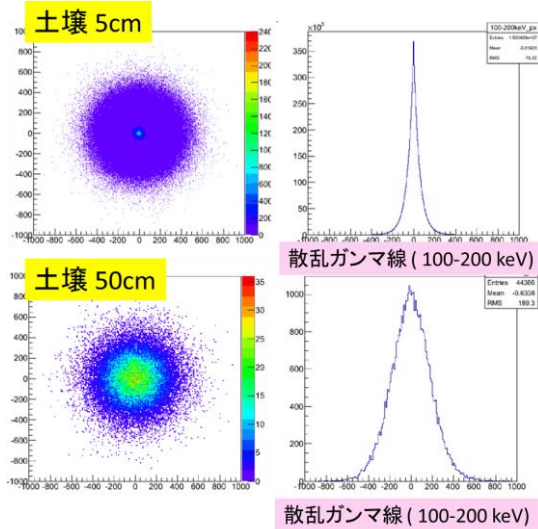


図 4: 土壌中 5cm(上), 50cm (下)に埋め込まれた ^{137}Cs 線源からの散乱ガンマ線画像。深度が深いほど、画像の広がりが増大する

を含む 3 次元画像再構成が可能か検証し、さらには福島・浪江町でのフィールド調査を行うことで、手法の有効性を実地検証した。シミュレーションにおいては、放射性物質 (^{137}Cs , ^{134}Cs) が土壌中に混在する様々なパターンを想定し、期待されるスペクトルと画像の変化を調べた。たとえば一例として、10m×10m の平板土壌 (厚みは可変) の中心に、点線源を埋め込んだ場合のシミュレーションを図 3 に示す。厚みが 5cm の場合に比べ、50cm では大きくスペクトルが歪み、散乱ガンマ線が急増することが分かる。これは福島県下で取得したスペクトルに近く、フィールド測定における散乱線の重要性を強く示唆している。散乱ガンマ線のイベント数を直接ガンマ線で割った比率は単調増加を示し、土壌深度の良いパラメータの一つになり得る。同様に、図 4 ではガンマ線の発生点を真上から見た場合に期待される画像を示した。土壌の厚みが 5cm の場合は点線源で画像の広がりが 7cm(FWHM)程度に対し、厚みが 50cm に対しては 40cm(FWHM)以上にまで広がっている。あくまで一例であるが、この簡単な例だけでもスペクトルの形状 (散乱 vs 直接ガンマ線) と画像の広がりには強い相関を持ち、かつ深さ情報を良く反映している。以下ではこの基本アイデアを踏襲し、さらに詳しい検討を行った。

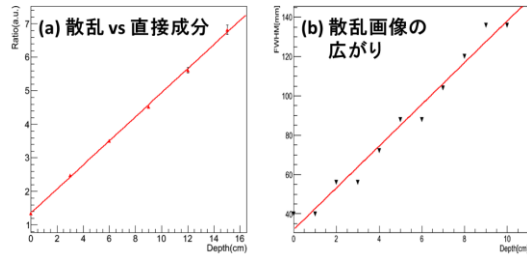


図 5: (a) スペクトルにおける A. 散乱成分 (50-150keV)、B 直接成分 (612-712keV) の比 = A/B を、深さの関数として実測したもの (b) 散乱ガンマ線 (100-200keV) の画像広がりを深さの関数としてプロットしたもの

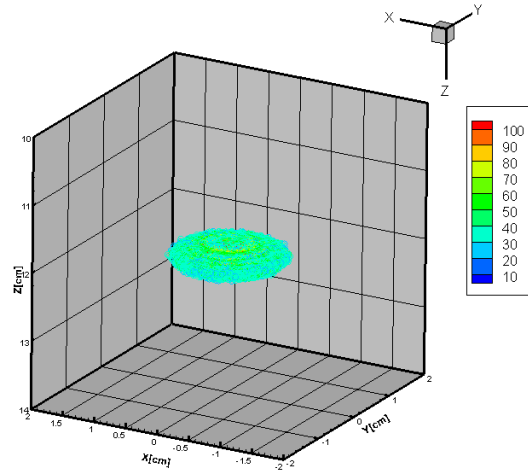


図 6: コンプトンカメラで撮影した ^{137}Cs の直接ガンマ線画像 (2 次元投影) に、奥行き方向の位置情報を加味して作成した 3 次元分布画像

4. 研究成果

まずはシミュレーションをベースに、様々な素材や厚みの散乱物質が存在する場合に、 ^{137}Cs からの直接ガンマ線 (662keV)、散乱ガンマ線の寄与を詳細なレファレンス・テーブルとして纏めた。過去の研究において、直接ガンマ線から僅かに低いエネルギー (光電ピークとコンプトンエッジの境界 500 keV 付近) を散乱成分として用いた研究は知られている。本研究では、これより遥かに低い 50-150 keV のほうが、散乱成分の検知に感度が高いことを見出し、これを実験とシミュレーションから検証した。続いて、厚みの異なる土壌やコンクリート中に線源を埋め込んだ場合、散乱ガンマ線の画像が広がる様子 (分散の値) をシミュレーションで求め、直接ガンマ線による広がりと比較した。いずれも非破壊かつ独立な手法であり、二つの異なる手法でガンマ線源の位置 (深さ) を 5 ミリ程度の精度で特定できることが示した。一例として、図 5(a) はコンクリート中における直接ガンマ線 (612-712keV) ・ 散乱ガンマ線 (50-150keV) のカウント数の比を、図 5(b) はコンクリート中の 100~200keV エネルギー帯の散乱線発生位置の広がりを深さの関数として示している。両者ともに、深さに対して非常に良い線形関係が見られる。これを元に、

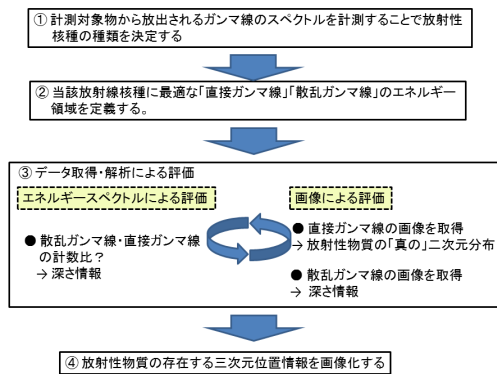


図 7: スペクトル情報と散乱画像の広がり を考慮した、3次元画像再構成のアルゴリズム

コンプトンカメラの実測誤差 (^{137}Cs) を考慮した 3次元画像を図 6 に示す。3次元画像再構成のアルゴリズムについては図 7 にフローチャートを示した。最後に、福島県浪江の森林部で取得したスペクトルと画像を用いて上記手法の適用を試みた。図 8(上) は森林部をコンプトンカメラによる撮影したもので 612keV-712keV の直接ガンマ線のみを使用している。土壌全体から ^{137}Cs ガンマ線が出ている様子が分かる。スクレーパープレートによる測定では土壌中の放射性物質の深度分布 $A(z)$ は指数関数 ($\propto \exp[-z/\beta]$) に概ね従うことが知られている。ここで β を緩衝強度 (Buffer depth) と呼ぶ。福島県下各所でのスクレーパー測定では、 $\beta = 0\sim 3$ [cm] に分布することが知られている。図 8(下) では浪江で実測したスペクトルを青で、図 7 の手法で推測した $\beta = 2.22$ [cm] を仮定した場合のシミュレーションを赤で示した。両者は極めてよい一致を示し、深度分布が誤差 0.5mm

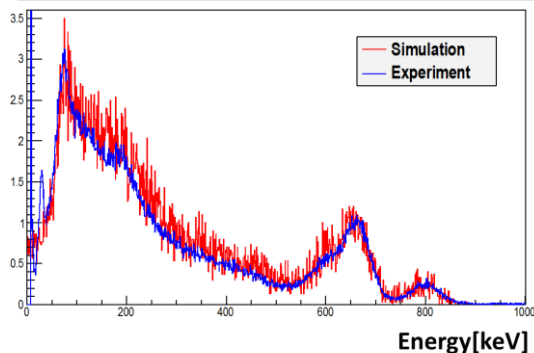
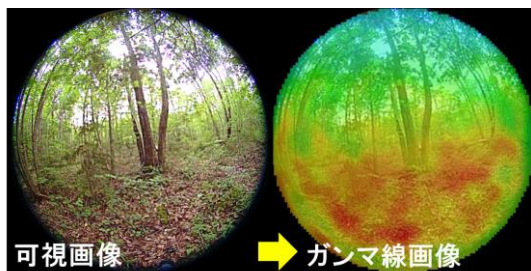


図 8: (上) 福島県浪江の森林で取得したガンマ線画像(^{137}Cs の直接ガンマ線)。 (下) 実測とシミュレーションによるスペクトル比較。直接線、散乱線の強度比から緩衝深度として $\beta = 2.2\text{cm}$ が予測され、実際両者は大変良い一致を示した

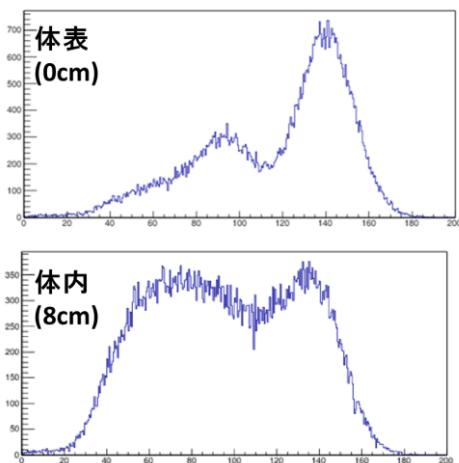


図 9: 体内深度を変化させた場合の $^{99\text{m}}\text{Tc}$ のスペクトル変化。本研究同様、140keV ガンマ線の直接成分、散乱成分の比率をパラメータとし、深度分布を正確に求めることができる

の精度で求められることが示された。

本研究で開発した技術は、散乱ガンマ線を積極的に利用した新しいイメージング手法であり、今後様々な分野への応用が期待できる。たとえば SPECT (単一光子放射断層撮影) は核医学における画像診断法の一つであるが、体内に投与した放射性核種 (たとえば 140keV を放出する $^{99\text{m}}\text{Tc}$) を検出し、分布を断層画像に焼き直す。通常、散乱ガンマ線はノイズとして除去され、個々の角度で取得した画像データからは体内における線源の深度分布は得られない。一方で、図 9 に示すとおり体内深度 (ここでは水で近似) によって直接線、散乱線の比率が線形に変化するため、本研究で開発した手法を用いて線源の深度情報を得ることが可能となる。散乱線として除去していたガンマ線を利用するため検出感度の劇的向上が見込まれ、また奥行き方向の情報集約により大幅な S/N 比の改善 (Signal-to-Noise 比) が見込まれる。今後は、本研究で得られた知見をもとに、様々な分野への応用に挑戦していきたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- (1) Y. Iwamoto, J. Kataoka, A. Kishimoto et al. "Novel methods for estimating 3D distributions of radioactive isotopes in materials", Nuclear Instruments and Methods section-A, vol. 831, pp. 295-300, (2016) 査読有
- (2) M. Takabe, A. Kishimoto, J. Kataoka et al., "Performance evaluation of newly developed SrI2(Eu) scintillator", Nuclear Instruments and Methods section-A, vol. 831, pp. 260-264, (2016) 査読有

〔学会発表〕（計 3 件）

(1) Jun Kataoka, “Si-PM-based scintillation detectors for next generation radiology imagin”, EMN 2016, (招待講演), Cancun, Mexico, 2016 年 6 月 15 日～6 月 19 日 (INVITED)

(2) Y. Iwamoto, J. Kataoka, A. Kishimoto et al., “Novel methods for estimating 3D distributions of radioactive isotopes in materials”, 10th International Hiroshima Symposium, Xi’an, China, 2015 年 9 月 25 日～9 月 29 日 (ORAL)

(3) M. Takabe, A. Kishimoto, J. Kataoka et al., “Performance evaluation of newly developed SrI2(Eu) scintillator”, 10th International Hiroshima Symposium, Xi’an, China, 2015 年 9 月 25 日～9 月 29 日 (POSTER)

〔図書〕（計 0 件）

○出願状況（計 1 件）

名称：放射性物質の三次元分布を計測する方法及びその装置

発明者：片岡淳，岸本彩，岩本康弘

権利者：早稲田大学

種類：特許

番号：特願 2015-12203

出願年月日：2015 年 1 月 26 日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

(1) 最先端の研究を発表「次代の中核研究者 2016」

<https://www.waseda.jp/top/news/50550>

(2) 「特集 Feature」見えないものを見る！放射線イメージングの未来（全 3 回配信）

<https://www.waseda.jp/top/news/48224>

(3) 早稲田大学理工学術院・先進理工学研究科・物理学及应用物理学専攻・片岡研究室

<http://www.spxg-lab.phys.waseda.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

片岡 淳 (KATAOKA, JUN)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：90334507