

Environment Research and Technology Development Fund

## 環境研究総合推進費 終了研究成果報告書

### 多チャンネル放射能深度分布測定器の実用化とIn-situ測定法の確立 (1RF-1602)

平成28年度～平成30年度

Practical Application of Multi-channel Radioactivity Depth Distribution Measuring System and Establishment  
of Its In-situ Measurement Technique

(英文パンフレット等[http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/english/gaiyou/pdf/2017\\_pamphlet\\_eng.pdf](http://www.env.go.jp/policy/kenkyu/suishin/english/gaiyou/pdf/2017_pamphlet_eng.pdf))

〈研究代表機関〉  
首都大学東京

〈研究協力機関〉  
徳島大学  
香川大学

2019年5月

## 目次

I. 成果の概要	1
1. はじめに（研究背景等）	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発の方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた主な成果	
6. 研究成果の主な発表状況	
7. 研究者略歴	
II. 成果の詳細	
II-1 多チャンネル放射能深度分布測定器の実用化とIn-situ測定法の確立	7
（首都大学東京）	
要旨	
1. はじめに	
2. 研究開発目的	
3. 研究開発方法	
4. 結果及び考察	
5. 本研究により得られた成果	
6. 国際共同研究等の状況	
7. 研究成果の発表状況	
8. 引用文献	
III. 英文Abstract	21

## I. 成果の概要

課題名 1RF-1602 多チャンネル放射能深度分布測定器の実用化とIn-situ測定法の確立  
 課題代表者名 井上 一雅（首都大学東京大学院人間健康科学研究科准教授）  
 研究実施期間 平成28～30年度  
 累計予算額 15,257千円  
 （うち平成28年度：5,172千円、平成29年度：5,172千円、平成30年度：4,913千円）  
 累計予算額は、間接経費を含む。

本研究のキーワード 放射能深度分布、放射性セシウム、In-situ測定、福島第一原子力発電所事故、ディープラーニング、モンテカルロシミュレーション

### 研究体制

(1) 多チャンネル放射能深度分布測定器の実用化とIn-situ測定法の確立（首都大学東京）

### 研究協力機関

徳島大学、香川大学

## 1. はじめに(研究背景等)

福島第一原子力発電所事故による放射性セシウムの土壌汚染に対して、その動態調査および除染作業が行われている。放射性セシウムは、徐々に表層から下方に移動する傾向にあり、土壌の性質に依存してその沈降速度が異なることから深度分布調査の実施が必要である。また、農地土壌の放射性物質を除去する際にも、適用する除染方法の決定に必要不可欠である。これに加えて、事故後の福島第一原子力発電所およびその周辺では、地下水のモニタリング法や現場管理を行っている汚染土壌の動態調査方法の確立も急務となっている。放射性セシウム濃度の深度分布を調査する方法として、スクレーパープレートを用いて土壌を表層から30 cm程度の深さまで1 cm間隔で土壌を削り取り、その土壌を実験室に設置している高純度ゲルマニウム半導体検出器などで放射性セシウムの濃度 (Bq/kg) を測定する手法が一般的に用いられている。本手法は、高精度に評価できる反面、土壌採取から試料測定までに数日間を要するため経時的なモニタリングは不可能であり、調査可能な範囲に限界がある。調査範囲を拡大するにしても、人員確保や技術者教育に膨大な費用と時間を要する。また、土壌採取場所は平坦な場所に限られ、山岳部の急斜面、地盤の緩い農地、地下水、砂地、河川の底質、ため池底での調査は困難である。そのため、これらの問題を解決するために、簡便に放射能深度分布を調査できる測定器と計測技術の開発が求められている。

## 2. 研究開発目的

報告者らは福島第一原子力発電所事故以降、CsI(Tl)シンチレーション検出器 (1 cm<sup>3</sup>) を10個装備した棒状の多チャンネル放射能深度分布測定器の試作を行ってきた。本測定器は、異なる深度に設置された10系統の検出器から独立したエネルギースペクトルを取得することが可能であり、30分程度で放射性セシウムの深度分布を計測することができる。本装置を実用化できれば、放射性セシウムの動態調査の作業効率が飛躍的に向上し、その結果として技術者の負担軽減と経費削減、除染作業の適正化につながる。また、スクレーパープレート法では困難であった山岳部、農地、ため池底などでの調査、降雨等による土壌中の放射性セシウムの経時変化を調査することが可能となり、これまで得ることが困難であった放射性セシウムの動態解明につながる。加えて、本試作器を動作させるための電源を継続的に確保できれば、除去汚染土壌の埋立て処分施設および中間貯蔵施設のモニタリングシステムとしての利用が期待できる。本研究では、上記の問題解決および行政ニーズに応えるために、報告者らが本研究開始以前に検討していた多チャンネル放射能深度分布測定器をベースとした深度分布調査技術の開発を目的

とした。

### 3. 研究開発の方法

#### (1) 多チャンネル放射能深度分布測定器の実用化とIn-situ測定法の確立

##### 検出器の改良と帰還困難区域における多チャンネル放射能深度分布測定器を用いた実測データの取得

深度40 cmまでを1回の計測で放射性セシウムの深度分布調査を可能とするため、試作段階の多チャンネル放射能深度分布測定器の改良を行った。試作段階の測定器は、土壌の表層から12 cmまでの深度にCsI(Tl)シンチレータを6個(2 cm間隔)、12 cmから24 cmまでの深度に2個(6 cm間隔)、24 cmから40 cmまでの深度に2個(8 cm間隔)配置していた。本研究実施前の予備調査では、土壌中の放射性セシウムのほとんどが表層より5 cm以内に存在していたため、浅層部における計測を密に実施可能な仕様としていた。しかし、福島県内の種々の調査地点で調査した結果、土壌質(砂地、粘土質、混合土等)に依存して表層部から30 cm程度までの範囲に放射性セシウムが広く分布しているため、CsI(Tl)シンチレータを20個装備させて表層より1 cm間隔で40 cmの深度まで計測可能な仕様とした。さらに、それぞれの深度における計測結果に対してエネルギー分析を行い、放射性セシウムのみ放射能濃度を算出できる仕様とした。

福島県内の帰還困難区域において、改良した多チャンネル放射能深度分布測定器を用いて計測を行った。比較のため、従来から使用されていたスクレーパープレートを用いて、1cm毎に表層より深度30 cmまでの土壌を採取して、高純度ゲルマニウム半導体検出器を用いて放射性セシウムの濃度計測を実施した。なお、調査の実施に際しては、帰還困難区域への一時立ち入り許可(公益目的)を得て実施した。研究では、スクレーパープレートを用いて得られたデータを真の放射能深度分布として、多チャンネル放射能深度分布測定器で得られた計測結果を評価した。

##### 検出器の応答特性の取得

多チャンネル放射能深度分布測定器から得られる数値はカウント値であるため、それを放射能濃度に換算する必要がある。本検討では、実験室内に校正場を設置して個々のシンチレータにおける応答特性を取得した。校正場は、可能な限り現場環境を再現した仕様とした。多チャンネル放射能深度分布測定器が挿入可能な直径30 mmφの穴の空いたアクリル製のトレイ(35 × 10 × 2 cm)を20個作成し、各トレイに珪砂、木節およびベントナイトを混合した土壌(密度: 0.961 g cm<sup>3</sup>)を入れ、それを回転テーブル上に積層した。校正用の点線源にはCs-137(線源強度: 2.68 MBq)を使用した。点線源は各層の土壌トレイに検出器中心から25、50、100、150および200 mmの位置に設置した。測定は、測定器のみを固定して、点線源を設置した土壌トレイが回転する条件下で実施した。1回転に要する時間は27 sに設定した。これにより、検出器を中心として土壌トレイに設置したCs-137点線源が一定の半径で回転してγ線が検出器側面より均等に入射される。これらの条件下で各層および異なる検出器-線源間距離において検出器の応答特性を取得した。

##### モンテカルロシミュレーションおよび深層学習ニューラルネットワークを駆使した放射能濃度計測技術の開発

多チャンネル放射能深度分布測定器から一定間隔層における正確な放射能濃度(Bq kg<sup>-1</sup>)を算出するためには、周辺深度からの影響を考慮した放射能濃度換算が必要となる。これは、土壌中の放射性セシウムが複数の層に分布しているため、周辺深度からの入射するγ線の影響を受けて計測結果が過大評価するためである。本影響は、検出器の応答特性を取得することにより、ある程度明らかにすることができるが、利用可能な線源が点線源に限定されるため、種々の異なる条件下で応答特性を取得することは困難である。そこで、Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS<sup>※1</sup>)を用いたシミュレーションを用いて実測を模擬可能な計算体系を構築した。さらに、本計算体系に単一層および複数層に放射性セシウムを配置して、計算体系内に模擬した多チャンネル放射能深度分布測定器から得られるデータを取得した。本検討では、単一層、連続する2層および3層に異なる強度の放射性セシウムを配置して、合計で1710種類の異なる条件下でシミュレーションしたデータを取得した。

実測データおよびPHITS計算より得られた多種多量のデータを学習データとして、新たに構築したDeep Learning Neural Network (DLNN) <sup>※2</sup>の学習を試みた。DLNNは、2層の積層自己符号化器と2層の階

層型ニューラルネットワークを組み合わせた構造とした。学習データは、実測およびシミュレーションにより多チャンネル放射能深度分布測定器で得られたデータを「入力データ」、スクレーパープレート法で得られた放射能濃度およびシミュレーションで設定した放射能濃度を「出力データ」とした。学習の効果を評価するため、本研究では、DLNNの出力が線源が存在する層において誤差率が±20%以内、かつ、その他の層においてはDLNNの出力が線源が存在する層の許容範囲外であれば正解とした。

※<sup>1</sup>PHITS：任意の体系中におけるさまざまな放射線の挙動を、核反応モデルや核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コード

※<sup>2</sup>DLNN：人工知能研究から派生する学習器の一種である深層学習ニューラルネットワーク

## 4. 結果及び考察

### (1) 多チャンネル放射能深度分布測定器の実用化とIn-situ測定法の確立

#### 検出器の改良と帰還困難区域における多チャンネル放射能深度分布測定器を用いた実測データの取得

多チャンネル放射能深度分布測定器の実用化に向けて試作段階の測定器を改良した。試作器ではCsI(Tl)シンチレータ (10 × 10 × 10 mm)、大面積Si PINフォトダイオードおよび電荷収集型プリアンプをそれぞれ10個装置した検出器であったが、深度40 cmまでの放射能濃度計測を1回の計測で可能とするため、これらを20個装備した検出器に改良した。なお、本改良による検出器サイズの変更はない。

福島県内の帰還困難区域において、国際原子力機関 (IAEA) により標準的な深さ方向の土壌試料採取方法と認められているスクレーパープレート法および多チャンネル放射能深度分布測定器を用いて放射性セシウムの深度分布調査を実施した。スクレーパープレート法では、地表面より深さ30 cmまで1 cm刻みで土壌を採取した。土壌中の含水率は、地表面で36%程度、深層では15%程度であった。採取した土壌は文部科学省放射能測定シリーズに準拠して、105 °Cで48時間乾燥させた後、篩を用いて粒子径を2 mm以下に整えた。その後、U-8容器に充填 (100 g) して試料の計測を行った。放射性セシウムの濃度測定は、ORTEC社製高純度ゲルマニウム半導体検出器 (HPGe) を使用した。測定時間は30,000秒とした。得られたエネルギースペクトルにおいて、<sup>134</sup>Cs (605 keV、796 keV) および<sup>137</sup>Cs (662 keV) の放射能濃度を計測した。さらに、得られた全ての結果は、試料採取日に起算して減衰補正を行った。多チャンネル放射能深度分布測定器を用いた方法では、農業用穴掘り機 (ドリル径：40 mm) を使用して測定器を挿入する穴をスクレーパープレートで土壌を採取する地点近傍に空けた。測定時間を土壌中の放射能濃度に応じて10分～30分と設定して、各検出器で得られる計数値を計測し、得られたエネルギースペクトルにおいて、536 - 864 keV (<sup>134</sup>Cs + <sup>137</sup>Cs) に位置するカウントを結果とした。本検討では、多チャンネル放射能深度分布測定器から得られる計数値が<sup>134</sup>Cs (605 keV、796 keV) および<sup>137</sup>Cs (662 keV) の3本の光電ピークの合計値であるため、HPGeから得られた結果についても3本の光電ピークから得られた放射能濃度の合計値とした。本検討では、確立された方法であるスクレーパープレート法と多チャンネル放射能深度分布測定器から得られる結果を比較することが目的であり、放射能濃度は実際の濃度とは異なる。スクレーパープレートを用いた調査結果は、多くの調査地点で表層から5 cmまでの深度で最大値を示し、その後は指数関数的に濃度が低くなる傾向を示した。一方で、多チャンネル放射能深度分布測定器で測定した結果は、最大濃度を示す深度はスクレーパープレート法での結果と一致したが、その他の深度においては、事前に想定していた周辺深度からの影響を受けて緩やかに低下する傾向を示した。これら2つのデータは、後述するDLNNの学習データとして使用した。

#### 校正場の設置と検出器の応答特性の取得

珪砂、木節およびバントナイトを混合した土壌をアクリル製トレイに入れ積層 (20段：40 cm) した校正場を用いて、多チャンネル放射能深度分布測定器の応答特性を取得した。アクリル製トレイの大きさは、事前のPHITSを用いたシミュレーション実験の結果をもとにして35 × 10 × 2 cmとした。また、アクリル製トレイの端から10 cmの位置に直径3 cmの穴を開けて検出器を挿入できる仕様とした。実験では、<sup>137</sup>Cs点線源をトレイに設置して、検出器中心より25 mmから250 mmの位置に設置して計測を行った。いずれの場合においても、線源設置位置をピークとして正規分布に似た分布が得られた。本

検討では、全ての段目において計測を行い検出器の応答特性を取得した取得した。これらのデータは、帰還困難区域で取得した実測データと同様に後述するDLNNの学習データとして使用した。

## **モンテカルロシミュレーションおよび深層学習ニューラルネットワークを駆使した放射能濃度計測技術の開発**

多チャンネル深度分布放射能測定器を模擬してPHITS計算を実行させるため、測定器の設計図から3D CADデータを作成し、PHITS計算の実行が可能となるようにMGAMを用いて体系を変換して構築した。PHITS計算では、作成した計算体系において任意に線源の種類や場所を設定して輸送計算が可能である。そのため、校正場を用いた実験では、測定結果の解析を容易にするため<sup>137</sup>Cs点線源を用いた単純な条件下で実施したが、PHITS計算を導入することにより、複数段にわたり面線源を配置して計算が可能となり、現場環境に合致したデータの取得を可能にした。

DLNNを用いた学習では、実測データおよびPHITS計算により得たデータをDLNNに入力して、予め準備しておいた結果になるように機械学習が可能となる体系を構築した。本検討では、一層および複数層に均一な線源を配置して20480個の入力データ（エネルギースペクトル：1024 ch×20検出器）をPHITS計算により1710データを作成した。最終的な目標は、構築した学習器に未知のデータが入力されたとき、線源が存在する層のみで出力データが得られるように構築したDLNNを学習させることである。DLNNの構造は、2層の積層自己符号化器と2層の階層型ニューラルネットワークを組み合わせたものとした。積層自己符号化器は、線源の位置と強度に関係した特徴量を抽出する役割があり、階層型ニューラルネットワークは、抽出した特徴量と線源の位置と強度を学習および判定する役割がある。本研究では、入力データが20480個であり、DLNNを通過したデータは最終的に20個の出力データのようにデータの次元数が圧縮される。機械学習では、各層をつなぐ信号伝達経路には重み付け係数が割り当てられており、学習により重み付け係数が最適な係数に更新されていく学習方式である。中間層（2層目および3層目）のデータ数は任意の数に設定が可能であるが、本検討では復元可能なデータ数を経験的に求め、それぞれ1024個および256個に設定して検討した。

構築したDLNNの学習効果を評価するため、過去に学習のために使用した1710個のデータを使用して検証した。その結果、測定精度を±20%とした場合の正答率は99.94%（1709/1710）であり、学習に使用したデータに対して十分に学習できている結果であった。一方、未学習（未知）のデータに対する正答率は、測定精度を±20%とした場合に74.56%（1275/1710）であった。今後の検討課題として、DLNNの精度を向上させるためには、実測データを高い精度で再現可能なシミュレーション体系の構築と十分な学習データ数の確保が必要であることを確認した。

## **5. 本研究により得られた主な成果**

### **(1) 科学的意義**

棒状の測定器（20個の独立した検出部）を用いた一次元計測から先端技術であるAIを放射能計測分野に取り入れて三次元計測を可能とした。これにより、検出器部に遮蔽板などを設置する必要がなく、コンパクト（検出部直径：30 mm、長さ：400 mm）な計測システムを構築すること可能であった。加えて、現場において放射性セシウムの深度分布調査を10分程度で完結することが可能であった。これは、従来のスクレーパープレートを用いた方法では1週間程度の時間を要していたが、本研究成果により飛躍的に調査効率を向上させることが可能となった。

これまで類似の深度分布測定器がJST・富士電機により開発されているが、現場で計測が完了するが土壌の採取が必要である。加えて、総重量が97 kgであり、移動には専用の車が必要となり測定場所が限定される。本申請研究で提案する可搬型深度分布測定器は5 kg程度であるため車載移動させる必要がなく、山岳部、地盤の緩い農地およびため池底などでの測定が可能である。加えて、業務従事者から一般市民までの使用を想定したソフトウェア開発を行うことにより、現場のあらゆるニーズに迅速に対応することが可能となる。

本研究で開発した三次元計測技術は、除去汚染土壌を適性管理するために利用が見込める。これまで、

空間線量率測定用のモニタリングポストは存在したが、土壌に対するモニタリングシステムは提案されていない。本技術を基盤としたシステムを開発することにより、IAEA等の国際機関が求める除去汚染土壌管理の適正化が図れる。

## (2) 環境政策への貢献

### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

### <行政が活用することが見込まれる成果>

モンテカルロシミュレーションおよびディープラーニングニューラルネットワークを駆使して開発した三次元放射能濃度計測技術は、除去汚染土壌用のモニタリングシステムに応用することが可能な技術である。本技術を基盤とした除去汚染土壌モニタリングシステムを開発することにより、中間貯蔵施設や埋立て処分場などにおいて、除去汚染土壌の直下にある土壌・地下水をリアルタイムに直接計測可能となり、管理の適正化を図ることができる。

本測定器を利用することにより、任意の現場で深度分布調査を完結でき除染作業で実施されている表土の剥ぎ取り厚の適切なコントロールが可能となる、これにより、過剰な剥ぎ取りや剥ぎ取り不足を抑止でき、除染の効率化や減容化を図ることができる。また、天地返し後の農地再開時および住民の帰還に際しては、適切に土壌の入れ替えが実施されているか、宅地内が適切に除染されているかを住民自身で確認することができ、住民の不安解消に寄与する。

## 6. 研究成果の主な発表状況

### (1) 主な誌上発表

#### <査読付き論文>

- 1) Sakama M, Fujimoto K, Inoue K, Fukushi M, Imajyo Y, Fukuhara T, Matsuura M, Yajima M, Endo M, Fujisawa M, Matsumoto E. Radiation Protection Dosimetry (2019)  
Development of In-situ multiple-channel depth distribution spectrometer to determine specific radioactivities of each targeted underground soil layer by PHITS newly incorporated into DLNN algorithm (in press)

### (2) 主な口頭発表(学会等)

- 1) Sakama M, Fujimoto K, Inoue K, Fukushi M, Imajyou Y, Fukuhara T, Matsuura M, Yajima T, Fujisawa M, Matsumoto E: 9th International Conference on High Level Environmental Radiation Areas (2018)  
Development of In-situ multiple-channel depth distribution spectrometer to determine specific radioactivities of earch targeted underground soil layer by PHITS newly incorporated into DLNN algorithm.
- 2) 阪間稔、藤本憲市、井上一雅、福士政広、荒井萌子、今城裕介、福原隆宏、遠藤倫崇、松浦貢、矢島辰雄、松本(川口)絵里佳、井原智也、井本尚吾、佐藤隆文: 第14回PHITS研究会/講習会(2018)  
PHITSと深層学習(DLNN)を組み合わせた多チャンネル放射線検出器の新しい放射線強度弁別処理技術の試み
- 3) 阪間稔、藤本憲市、井上一雅、福士政広、荒井萌子、今城裕介、福原隆雄、松浦貢、矢島辰雄、松本絵里佳: 日本保健物理学会第50回研究発表会(2017)  
PHITSとDLNNを組み合わせた新しい放射能強度決定の試み: In-situ多チャンネル放射能濃度深度分布測定器の開発
- 4) 阪間稔、藤本憲市、松本絵里佳、井上一雅、福士政広、今城祐介、福原隆宏、松浦貢: 第12回PHITS定期講習会/研究会(2016)  
PHITSとDLNNを組み合わせたIn-situ多チャンネル放射能濃度深度分布測定の放射能濃度決定への取り組み
- 5) 阪間稔、藤本憲市、松本絵里佳、井上一雅、福士政広、今城祐介、福原隆宏、松浦貢: プラズマシミュレーション

ポジウム(2016)

PHITSとDLNNによる放射能濃度深度分布測定に関わる検出効率シミュレーションの試み

## 7. 研究者略歴

研究代表者

井上 一雅

首都大学東京大学院保健科学研究科修了、博士(保健科学)、現在、首都大学東京大学院人間健康科学研究科准教授

研究分担者

特に記載すべき事項はない。

## II. 成果の詳細

### II-1 多チャンネル放射能深度分布測定器の実用化とIn-situ測定法の確立

首都大学東京

人間健康科学研究科 放射線科学域 井上 一雅

平成28年度～30年度累計予算額：15,257千円

(うち平成28年度：5,172千円、平成29年度：5,172千円、平成30年度：4,913千円)

累計予算額は、間接経費を含む。

#### [要旨]

福島第一原子力発電所事故により生じた汚染土壌に対する除染作業の合理化が求められている。これまでの調査において、放射性セシウムの深度分布は土壌種や地形に依存して深度分布が異なるため、深度分布調査を実施することにより剥ぎ取り厚の最適化が必要となる。これにより、除染費用の圧縮と除去汚染土壌の減容化が可能となる。しかし、現在の深度分布調査方法は、スクレーパープレートを用いて土壌を採取して、採取土壌を実験室内に設置されている装置で計測が必要である。そのため、土壌を採取してから結果を得るまでに1週間程度の時間を要する。本研究では、土壌の採取が不要で現場で調査を完結できる多チャンネル放射能深度分布測定器の開発を行った。測定器は、CsI(Tl)シンチレータを20個装備したものを構築して、1回の測定で深度40 cmまでの各深度におけるセシウムに起因した放射線を計測可能とした。計測値から放射能濃度を算出するために、階層型ニューラルネットワークを利用した。入力データとして、深度分布測定器で得られた実測データおよび実測データを模擬可能なシミュレーション体系により得られたシミュレーションデータを用い、出力データをスクレーパープレート法およびシミュレーションで作成したデータを用い、階層型ニューラルネットワークを機械学習させた。これにより、未知の計測データが入力されたとき、各層において正確な放射能濃度を算出できるシステムを構築した。複数のシミュレーションデータを作成して精度を検証した結果、±20%の精度を確保することが可能であった。多チャンネル放射能深度分布測定器の開発により、深度分布調査を30分程度に短縮することが可能であった。今後、本研究成果を基盤として、除染作業の合理化と除去汚染土壌を管理する中間貯蔵施設などでの利用が期待できる。

#### [キーワード]

放射能深度分布、放射性セシウム、In-situ測定、福島第一原子力発電所事故、ディープラーニング、モンテカルロシミュレーション

#### 1. はじめに

福島第一原子力発電所事故による放射性セシウムの土壌汚染に対して、その動態調査および除染作業が行われている。放射性セシウムは、徐々に表層から下方に移動する傾向にあり、土壌の性質に依存してその沈降速度が異なることから深度分布調査の実施が必要である。また、農地土壌の放射性物質を除去する際にも、適用する除染方法の決定に必要不可欠である。これに加えて、事故後の福島第一原子力発電所およびその周辺では、地下水のモニタリング法や現場管理を行っている汚染土壌の動態調査方法の確立も急務となっている。放射性セシウム濃度の深度分布を調査する方法として、スクレーパープレートを用いて土壌を表層から30 cm程度の深さまで1 cm間隔で土壌を削り取り、その土壌を実験室に設置している高純度ゲルマニウム半導体検出器などで放射性セシウムの濃度 (Bq/kg) を測定する手法が一般的に用いられている。本手法は、高精度に評価できる反面、土壌採取から試料測定までに数日間を要するため経時的なモニタリングは不可能であり、調査可能な範囲に限界がある。調査範囲を拡大するにしても、人員確保や技術者教育に膨大な費用と時間を要する。また、土壌採取場所は平坦な場所に限られ、

山岳部の急斜面、地盤の緩い農地、地下水、砂地、河川の底質、ため池底での調査は困難である。そのため、これらの問題を解決するために、簡便に放射能深度分布を調査できる測定器と計測技術が求められている。

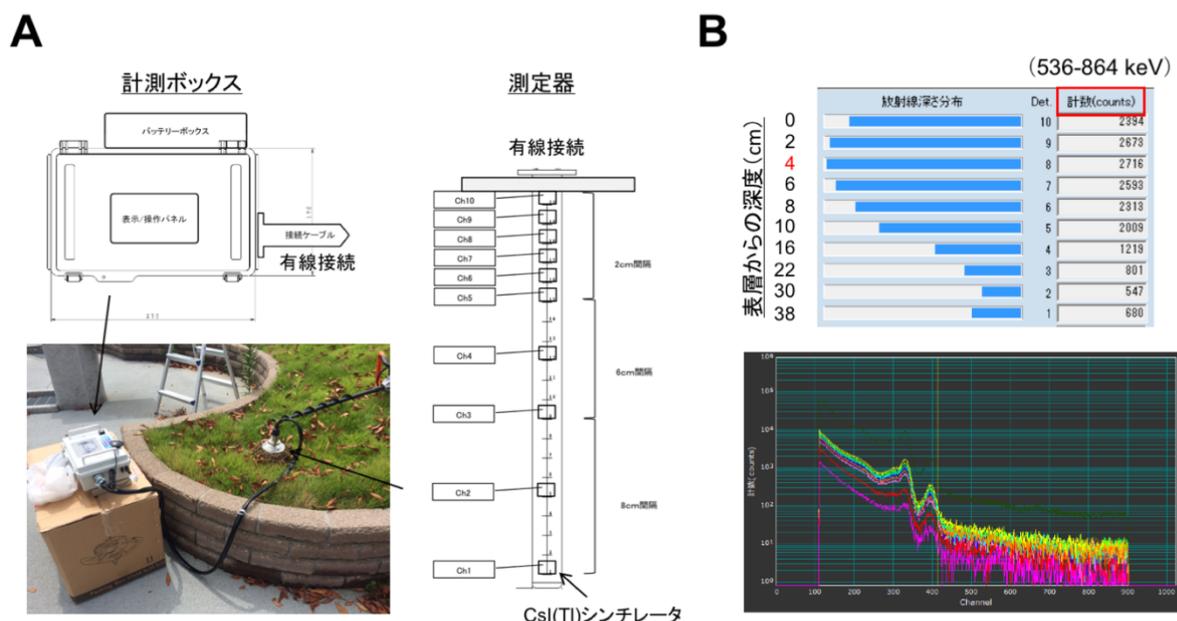
## 2. 研究開発目的

報告者らは福島第一原子力発電所事故以降、CsI(Tl)シンチレーション検出器 (1 cm<sup>3</sup>) を10個装備した棒状の多チャンネル放射能深度分布測定器の試作を行ってきた。本測定器は、異なる深度に設置された10系統の検出器から独立したエネルギースペクトルを取得することが可能であり、30分程度で放射性セシウムの深度分布を計測することができる。本装置を実用化できれば、放射性セシウムの動態調査の作業効率が飛躍的に向上し、その結果として技術者の負担軽減と経費削減、除染作業の適正化につながる。また、スクレーパープレート法では困難であった山岳部、農地、ため池底などでの調査、降雨等による土壌中の放射性セシウムの経時的変化を調査することが可能となり、これまでに得ることが困難であった放射性セシウムの動態解明につながる。加えて、本試作器を動作させるための電源を継続的に確保できれば、除去汚染土壌の埋立て処分施設および中間貯蔵施設のモニタリングシステムとしての利用が期待できる。本研究では、上記の問題解決および行政ニーズに応えるために、これまでに検討してきた多チャンネル放射能深度分布測定器をベースとした深度分布調査技術の開発を目的とした。

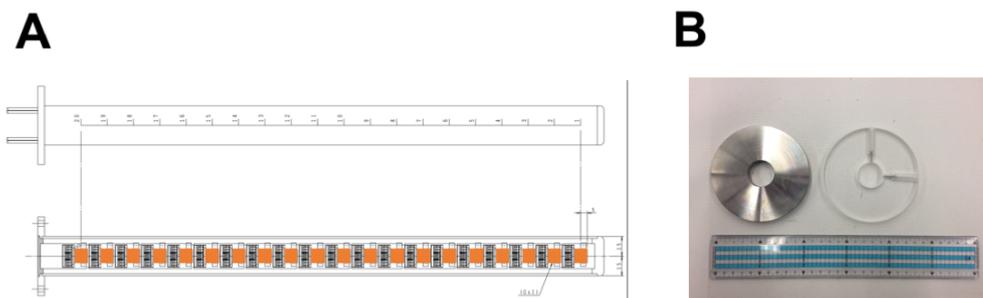
## 3. 研究開発方法

### 多チャンネル放射能深度分布測定器の改良

本研究の目的を達成させるために、申請者がこれまでに試作してきた多チャンネル放射能深度分布測定器をベースとして改良を実施した。試作段階の測定器の概略図を図(1)-1に示す。試作段階の測定では、土壌の表層から12 cmまでの深度にCsI(Tl)シンチレータを6個 (2 cm間隔)、12 cmから24 cmまでの深度に2個 (6 cm間隔)、24 cmから40 cmまでの深度に2個 (8 cm間隔) 配置していた (図(1)-1)。研究実施前の検討では、土壌中の放射性セシウムのほとんどが表層より5 cm以内に存在していたため、浅層部における計測を密に実施可能な仕様としていた。しかし、福島県内の帰還困難区域で実施した調査において、土壌質 (砂地、粘土質、混合土等) に依存して表層部から20 cm程度までの範囲に放射性セシウムが広く分布していた。そのため、CsI(Tl)シンチレータを20個装備させて、表層より2 cm間隔で40 cmの深度まで計測可能な仕様とした。加えて、表層レベルガードを周辺環境からの影響を考慮して、プラスチック製からステンレス製に変更した (図(1)-2)。主な変更点を表(1)-1にまとめて示す。



図(1)-1 試作段階の多チャンネル放射能深度分布測定器の概略図 (A) と解析結果の一例 (B)



図(1)-2 改良型多チャンネル放射能深度分布測定器の概要図 (A) とガードリング (B)

表(1)-1 試作段階の多チャンネル放射能深度分布測定器の主な仕様と変更点

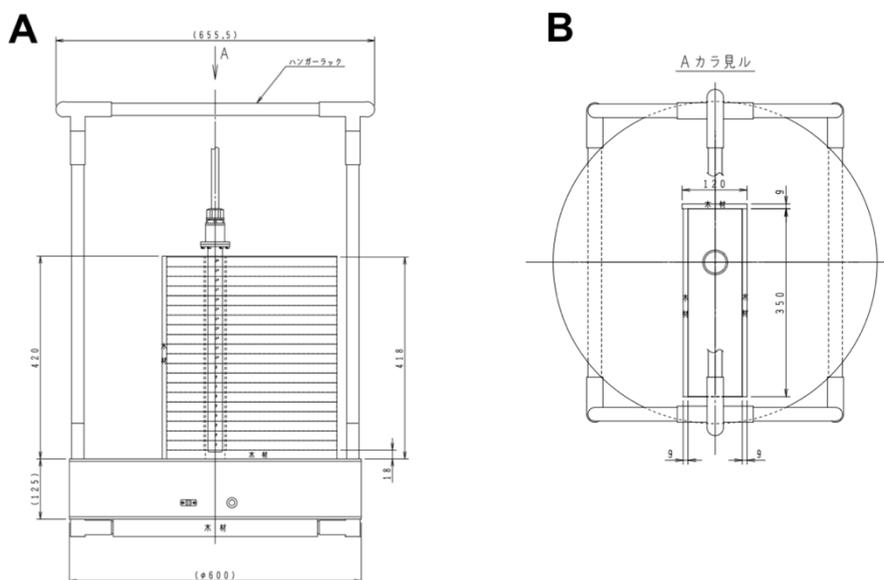
部 位	仕 様	変 更 点
検出器	CsI(Tl)シンチレータ (10 × 10 × 10 mm) 10個 大面積Si PINフォトダイオード10個 電荷収集型プリアンプ内蔵 10個	CsI(Tl)シンチレータ (10 × 10 × 10 mm) 20個 大面積Si PINフォトダイオード20個 電荷収集型プリアンプ内蔵 20個
検出器 ロッド	ステンレススチール (厚さ: 1.0 mm、直径: 30 mm φ)	
検出器配置	表層から12 cm: 2 cm間隔 (数量: 6個) 12 cmから24 cm: 6 cm間隔 (数量: 2個) 24 cmから40 cm: 8 cm間隔 (数量: 2個)	表層から40 cm: 2 cm間隔 (数量: 20個)
波形整形 アンプ	アクティブフィルタ型波形整形 (波形整形時定数: 2 μs) 増幅率 2.0 keV/ch 測定可能レンジ 150 keV - 1800 keV 入出力チャンネル 10 ch	入出力チャンネル 20 ch
パルス波高分析	ピークセンシング ADC コンバージョン分解能 1024 ch	
性能	装置エネルギー分解能 8.0% ( <sup>137</sup> Cs 662 keV) エネルギー校正 2.0 keV/ch (±5%)	
制御プロセッサ	組み込み用小型CPUボード (Processor AM335x 1GHzARM® Cortex-A8)	
バッテリー	大容量モバイルバッテリー (12000 mAh)	
データ記録	USBメモリ	
通信 ケーブル	シリアルポート USB/シリアル変換	
GPS受信器	GlobalSet社製 BU-353S4	
表層レベルガー ド	アクリル製ガードリング (110 cm φ)	ステンレス製ガードリング (110 cm φ)
接続ケーブル保 護チューブ	送水ビニールホース	

試作段階の多チャンネル放射能深度分布測定器は、異なる深度に設置された個々の検出器で計測されるカウント (cps) のみが記録可能な仕様である。そのため、本測定器の実用化を目指す場合、個々の検出器の応答特性を考慮してカウントから放射能濃度 (Bq/kg) に換算する必要がある。また、測定器内の20個のシンチレータ間に遮蔽体等を設置していないため、検出器に射入する放射線の影響 (周辺深度からの影響) を除去する必要がある。そこで、福島県内の帰還困難区域において、改良した多チャンネル放射能深度分布測定器を用いて計測を行った。比較のため、従来から使用されていたスクレーパープレートを用いて1 cm毎に表層より深度30 cmまでの土壌を採取して、高純度ゲルマニウム半導体検出器を用

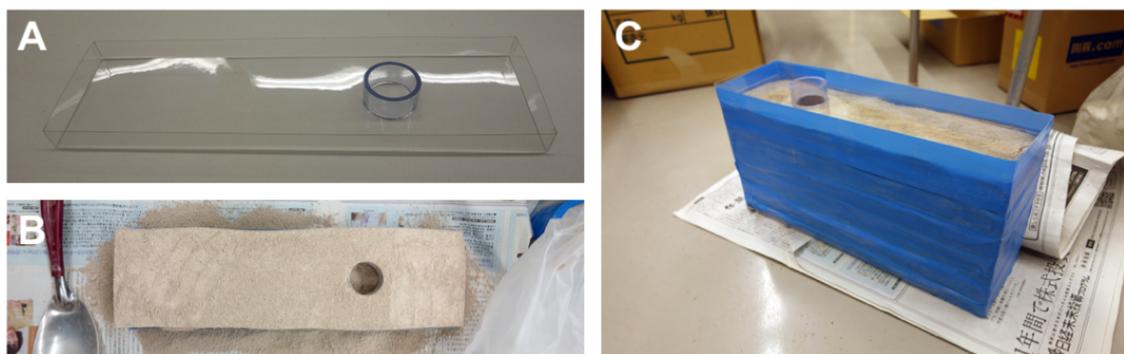
いて放射性セシウムの濃度を計測した。なお、調査の実施に際しては、帰還困難区域への一時立ち入り許可（公益目的）を得て実施した。研究では、スクレーパープレートを用いて得られたデータを真の放射能深度分布として、多チャンネル放射能深度分布測定器で得られた計測結果を評価した。

### 検出器の応答特性の取得

多チャンネル放射能深度分布測定器から得られる計測値を放射能換算するためには、校正場を設置して個々のシンチレータの応答特性の取得が必要となる。そこで、実験室内に現場環境を再現した校正場を設置した。校正場の概略図を図(1)-3に示す。多チャンネル放射能深度分布測定器が挿入可能な直径30 mm  $\phi$  の穴の空いたアクリル製のトレイ（35 × 10 × 2 cm）を20個作成し、各トレイに珪砂、木節およびベントナイトを混合した土壌（密度：0.961 g cm<sup>3</sup>）を入れ、それを回転テーブル上に積層した（図(1)-4参照）。校正用の点線源にはCs-137（線源強度：2.68 MBq）を使用した。点線源は各層の土壌トレイに検出器中心から25、50、100、150および200 mmの位置に設置した。測定は、測定器のみを固定して、点線源を設置した土壌トレイのみが回転する条件下で実施した。1回転に要する時間は27 sに設定した。これにより、検出器を中心として土壌トレイに設置したCs-137点線源が一定の半径で回転して $\gamma$ 線が検出器側面より均等に入射される。これらの条件下で各層において検出器の応答特性を取得した。



図(1)-3 校正場の概略図



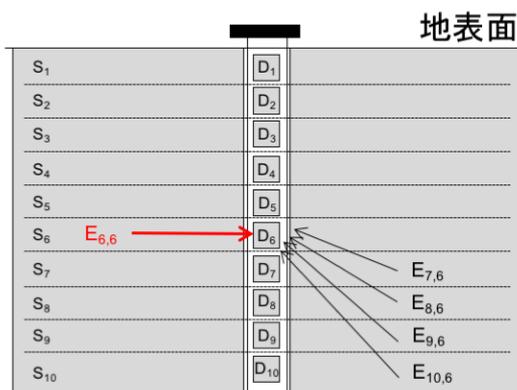
図(1)-4 混合土壌配置用のアクリル製トレイ

## モンテカルロシミュレーションおよび深層学習ニューラルネットワークを駆使した放射能濃度計測技術の開発

多チャンネル放射能深度分布測定器から一定間隔層における放射能濃度 ( $\text{Bq kg}^{-1}$ ) を計測するためには、周辺深度からの影響を考慮する必要がある。図(1)-5にCsI(Tl)シンチレータを10個装備した測定器における周辺深度からの影響を示す。例えば、検出器 $D_6$ の層における正確な放射性セシウムの放射能濃度を計測するためには、土壌層 $S_6$ から入射する $\gamma$ 線 ( $E_{6,6}$ ) のみを計測する必要がある。しかし、実際には複数の土壌層にわたり放射性セシウムが分布しているため、 $D_6$ で得られる結果は複数の土壌層に存在する放射性セシウム濃度の合計値となる。本影響は、帰還困難区域において実測データを収集することにより、ある程度明らかにすることができるが、種々の異なる条件下で実測データを収集するのは困難である。そこで、Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS<sup>\*1</sup>) を用いたシミュレーションを用いて実測を模擬可能な計算体系を構築した。シミュレーション体系を構築には、多チャンネル放射能深度分布測定器の設計図から3次元CADデータを作成し、PHITSのインプット形式に変換するため Monte Carlo Automatic Modeling System (MCAM<sup>\*2</sup>) を用いてデータを変換した。図(1)-6にこれらのイメージ図を示す。本研究では、構築した計算体系に単一層および複数層に放射性セシウムを配置して、計算体系内に模擬した多チャンネル放射能深度分布測定器から得られるデータを取得した。本検討では、単一層、連続する2層および3層に異なる強度の放射性セシウムを配置して、合計で1710種類の異なる条件下でシミュレーションしたデータを取得した。

\*<sup>1</sup>PHITS：任意の体系中におけるさまざまな放射線の挙動を、核反応モデルや核データを用いて模擬するモンテカルロ計算コード

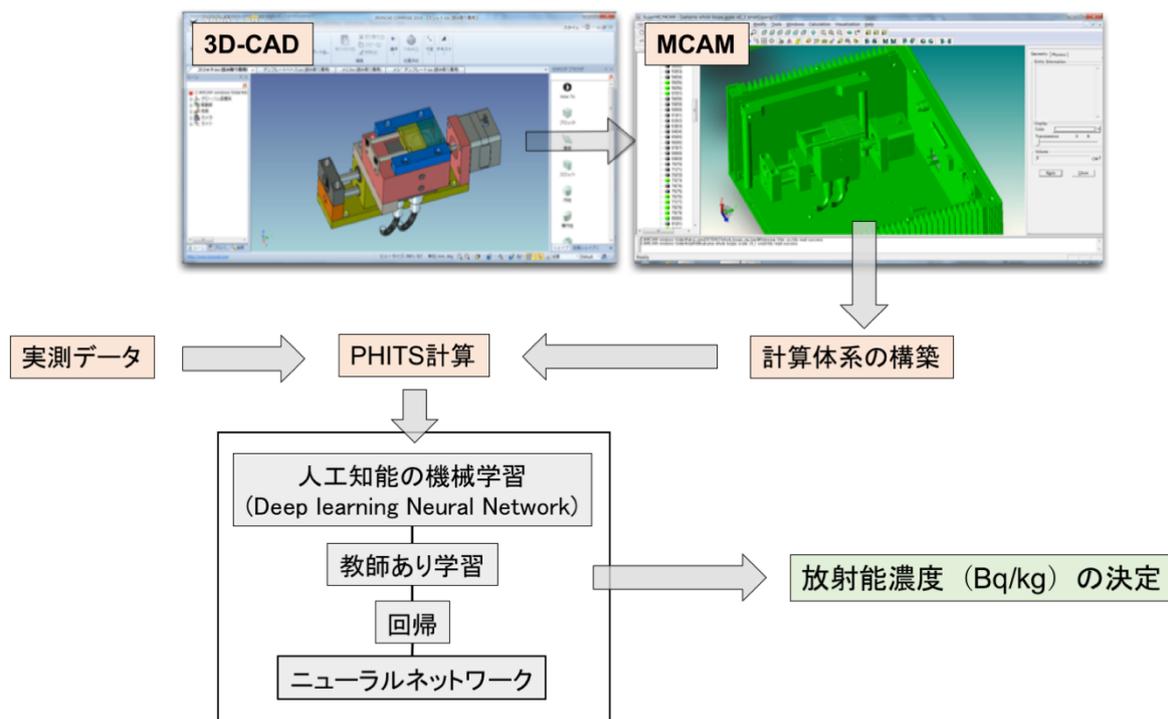
\*<sup>2</sup>MCAM：一般的なCADソフトウェアで設計されたデータからPHITS計算が可能な体系に変換するための支援ソフトウェア



図(1)-5 周辺深度からの影響

実測データおよびPHITS計算より得られた多種多量のデータを学習データとして、新たに構築した Deep Learning Neural Network (DLNN) <sup>\*3</sup> の学習を試みた。DLNNは、2層の積層自己符号化器と2層の階層型ニューラルネットワークを組み合わせた構造とした。学習データは、実測およびシミュレーションにより多チャンネル放射能深度分布測定器で得られたデータを「入力データ」、スクレーパープレート法で得られた放射能濃度およびシミュレーションで設定した放射能濃度を「出力データ」とした。学習の効果を評価するため、本研究では、DLNNの出力が線源の存在する層において誤差率が $\pm 20\%$ 以内、かつ、その他の層においてはDLNNの出力が線源の存在する層の許容範囲外であれば正解とした。

\*<sup>3</sup>DLNN：人工知能研究から派生する学習器の一種である深層学習ニューラルネットワーク



図(1)-6 PHITSおよびDLNNを用いた放射能濃度決定までのプロセス

#### 4. 結果及び考察

##### 検出器の改良と帰還困難区域における多チャンネル放射能深度分布測定器を用いた実測データの取得

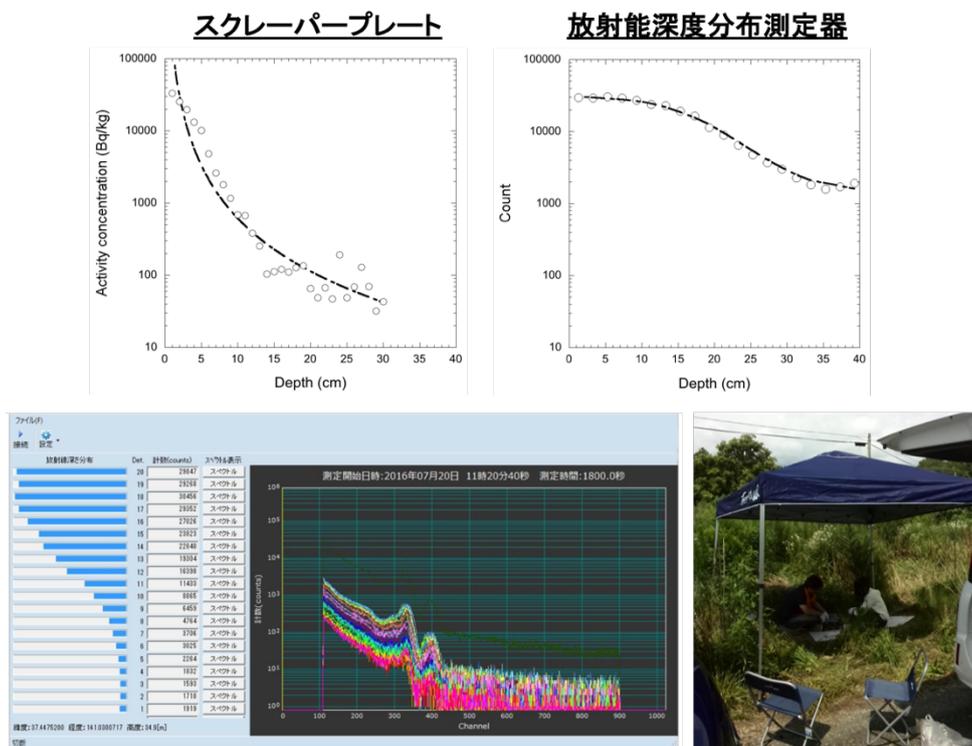
多チャンネル放射能深度分布測定器の実用化に向けて試作段階の測定器を改良した。試作器ではCsI(Tl)シンチレータ(10 × 10 × 10 mm)、大面積Si PINフォトダイオードおよび電荷収集型プリアンプをそれぞれ10個装置した検出器であったが、深度40 cmまでの放射能濃度計測を1回の計測で可能とするため、これらを20個装備した検出器に改良した。

福島県内の帰還困難区域において、国際原子力機関(IAEA)により標準的な深さ方向の土壌試料採取方法と認められているスクレーパープレート法および多チャンネル放射能深度分布測定器を用いて放射性セシウムの深度分布調査を実施した。スクレーパープレート法では、図(1)-7に示すように地表面より深さ30 cmまで1 cm刻みで土壌を採取した。採取した土壌は文部科学省放射能測定シリーズに準拠して、105°Cで48時間乾燥させた後、篩を用いて粒子径を2 mm以下に整えた。その後、U-8容器に充填(100 g)して試料の計測を行った。放射性セシウムの濃度測定は、ORTEC社製高純度ゲルマニウム半導体検出器(HPGe)を使用した。測定時間は30,000秒とした。得られたエネルギースペクトルにおいて、 $^{134}\text{Cs}$ (605 keV、796 keV)および $^{137}\text{Cs}$ (662 keV)の放射能濃度を計測した。さらに、得られた全ての結果は、試料採取日に起算して減衰補正を行った。多チャンネル放射能深度分布測定器を用いた方法では、図(1)-3に示す農業用穴掘り機(ドリル径:40 mm)を使用して測定器を挿入する穴をスクレーパープレートで土壌を採取した地点近傍に空けた。測定時間を30分と設定して、各検出器で得られる計数値を計測した。得られたエネルギースペクトルにおいて、536 - 864 keV( $^{134}\text{Cs}$  +  $^{137}\text{Cs}$ )に位置するカウントを結果とした。

代表的な結果を図(1)-8に示す。本検討では、多チャンネル放射能深度分布測定器から得られる計数値が $^{134}\text{Cs}$ (605 keV、796 keV)および $^{137}\text{Cs}$ (662 keV)の3本の光電ピークの合計値であるため、HPGeから得られた結果についても3本の光電ピークから得られた放射能濃度の合計値とした。本検討では、確立された方法であるスクレーパープレート法と多チャンネル放射能深度分布測定器から得られる結果を比較することが目的であり、実際の濃度とは異なる。これら2つのデータは、後述するDLNNの学習データとして使用した。



図(1)-7 福島県双葉町内帰宅困難区域における深度分布調査の様子



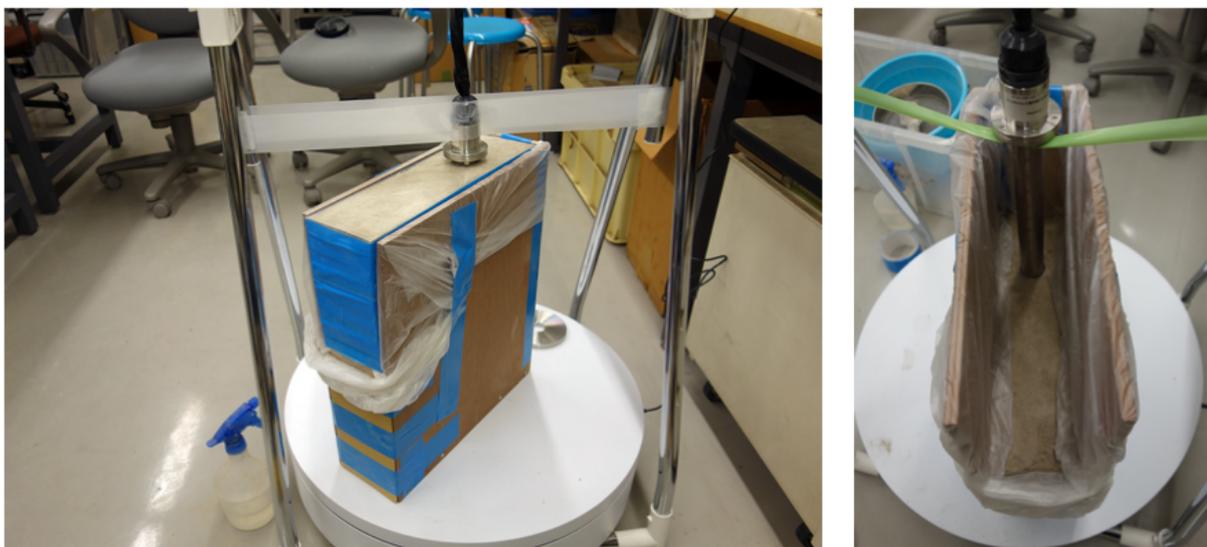
図(1)-8 スクレーパープレート法および多チャンネル放射能深度分布測定器で得られた代表的な測定結果

スクレーパープレート法で得られた結果は、図(1)-8に示すように土壌表面における放射能濃度が最も高く、地表面より6 cm以下の深度ではその濃度が急激に低下した。一方で、多チャンネル放射能深度分布測定器から得られた結果は、地表面より6 cmの深度において最大値を示し、それ以下の深度では緩やかに低下傾向を示し、事前に想定していた周辺の深度からの影響を受けた結果となった。土壌中の含水率は、地表面で36%程度、深層では15%程度であり、いずれの調査地点においても同様の傾向を示した。多チャンネル放射能深度分布測定器の実用化が進んだ場合、測定場所が制限されないため種々の用途に利用可能となることが予想される。今後の検出器の改良に際して、測定器の利用方法を明確にしてそれ

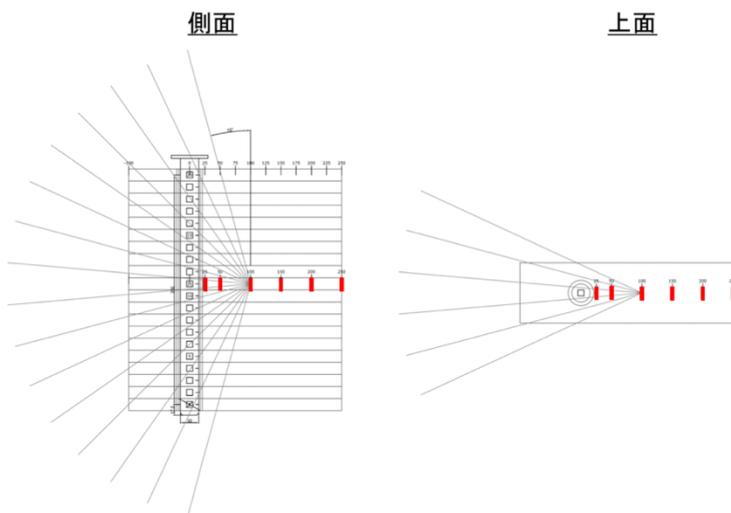
に求められる性能（感度、精度、位置分解能）を検討する必要性があることも確認した。

### 校正場の設置と検出器の応答特性の取得

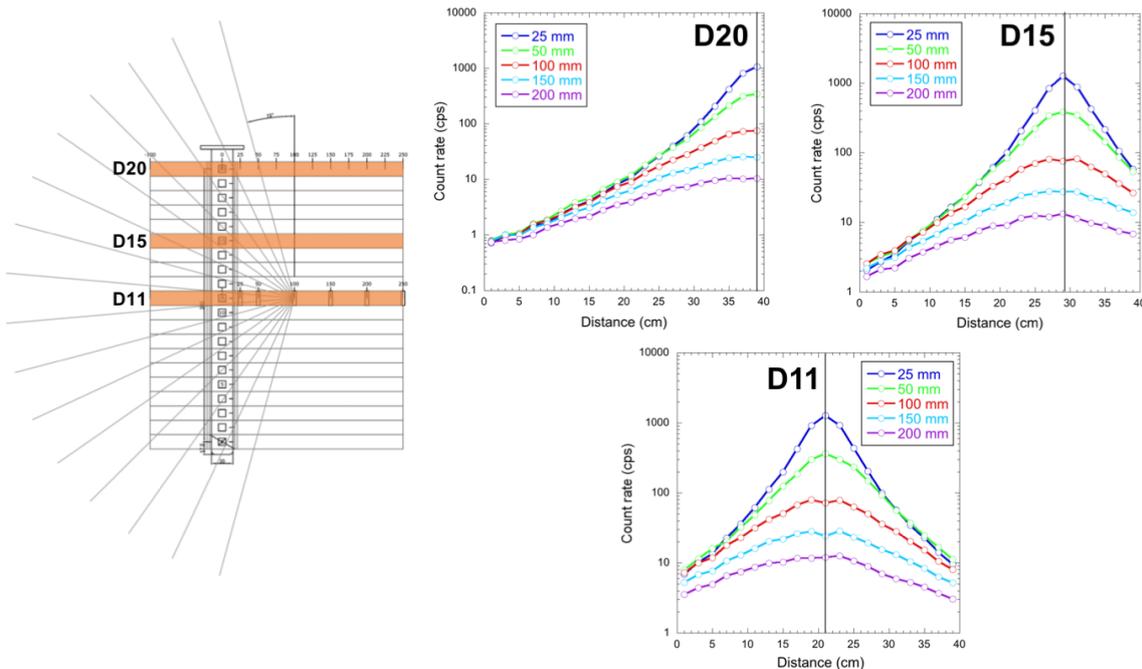
硅砂、木節およびベントナイトを混合した土壌をアクリル製トレイに入れ積層した校正場を用いて、多チャンネル放射能深度分布測定器の検出効率を計測した。図(1)-9に測定器を挿入した際の様子を示す。アクリル製トレイの大きさは、事前のPHITSを用いたシミュレーション実験の結果をもとにして $35 \times 10 \times 2$  cmとした。実験では、 $^{137}\text{Cs}$ 点線源を各トレイに設置して、図(1)-10に示すように検出器中心より25 mmから250 mmの位置に設置して計測を行った。図(1)-11に測定器の中心部に位置する11段目のトレイ、15段目および測定器の端に位置する20段目のトレイに $^{137}\text{Cs}$ 点線源を配置して得られた結果を示す。いずれの場合においても、線源設置位置をピークとして正規分布に似た分布が得られた。11段目の25 mmの距離に $^{137}\text{Cs}$ 点線源を設置した場合のD11における検出効率（CsI(Tl) 1 cm<sup>3</sup>）は0.05%であった。また、11段目のトレイに $^{137}\text{Cs}$ 点線源を設置した場合、測定器端（D1およびD20）で検出される割合（周辺深度からの影響）は1%以下であった。本検討では、全ての段目において計測を行い検出器の応答特性の基礎データを取得した。これらのデータは、帰還困難区域で取得した実測データと同様に後述するDLNNの学習データとして使用した。



図(1)-9 校正場に多チャンネル放射能深度分布測定器を挿入した際の様子



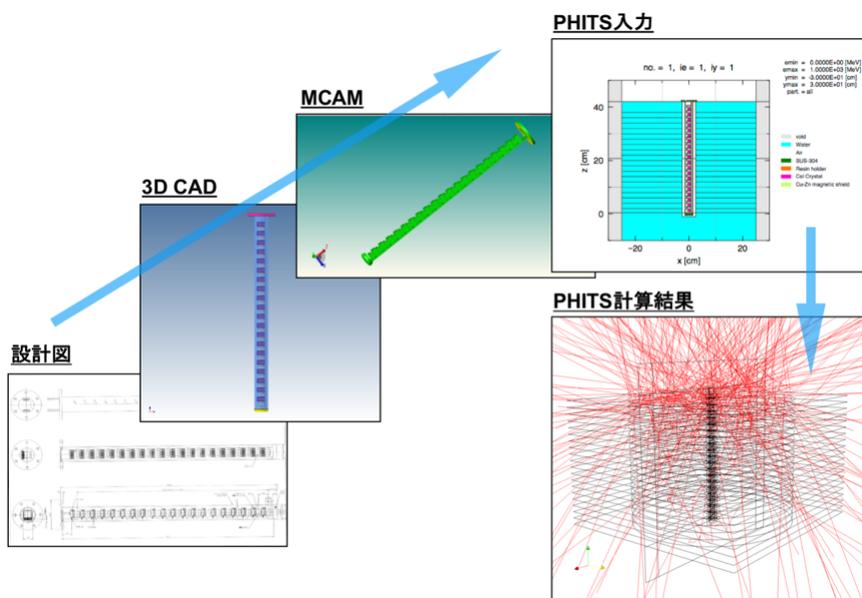
図(1)-10  $^{137}\text{Cs}$ 点線源を検出器中心より100 mmの位置に設置した場合の概略図



図(1)-11 校正場における各検出器の応答特性

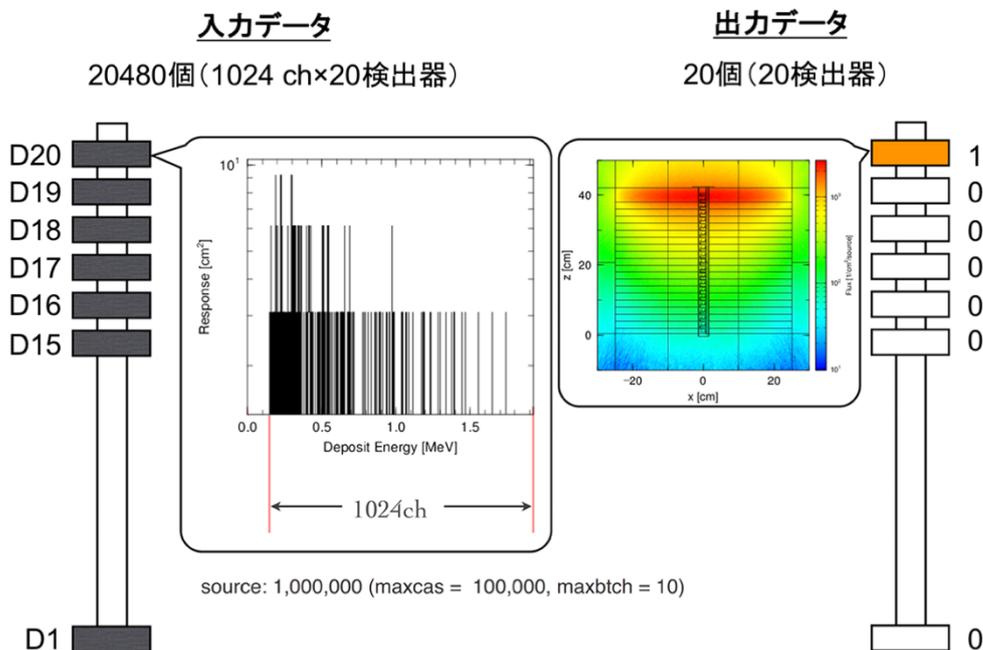
**モンテカルロシミュレーションおよび深層学習ニューラルネットワークを駆使した放射能濃度計測技術の開発**

多チャンネル深度分布放射能測定器を模擬してPHITS計算を実行させるため、測定器の設計図から3D CADデータを作成し、PHITS計算の実行が可能となるようにMCAMを用いて体系を変換(図(1)-12)して構築した。PHITS計算では、作成した計算体系において任意に線源の種類や場所を設定して輸送計算が可能である。そのため、校正場を用いた実験では測定結果の解析を容易にするため<sup>137</sup>Cs点線源を用いた単純な条件下で実施したが、PHITS計算を導入することにより、複数段にわたり面線源を配置して計算が可能となり、現場環境に合致したデータの取得を可能にした。



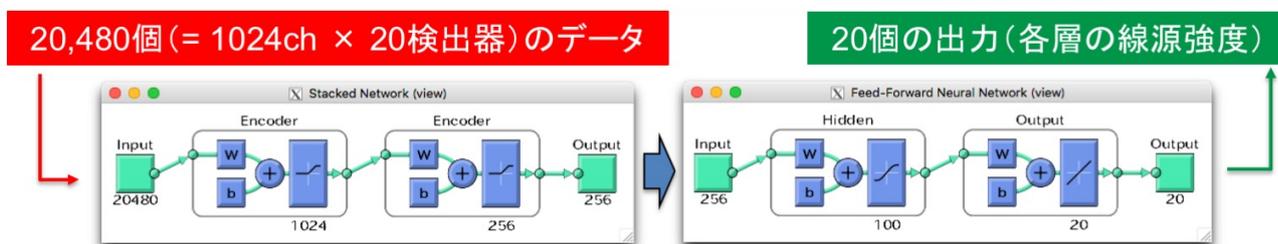
図(1)-12 PHITS計算体系の構築手順

DLNNを用いた学習では、実測データおよびPHITS計算により得たデータをDLNNに入力して、予め準備しておいた結果になるように機械学習が可能な体系を構築した(図(1)-13)。本検討では、一層および複数層に均一な線源を配置して20480個の入力データ(エネルギースペクトル:1024 ch×20検出器)をPHITS計算により1710データを作成した。最終的な目標は、構築した学習器に未知のデータが入力されたとき、線源が存在する層のみで出力データが得られるように構築したDLNNを学習させることである。

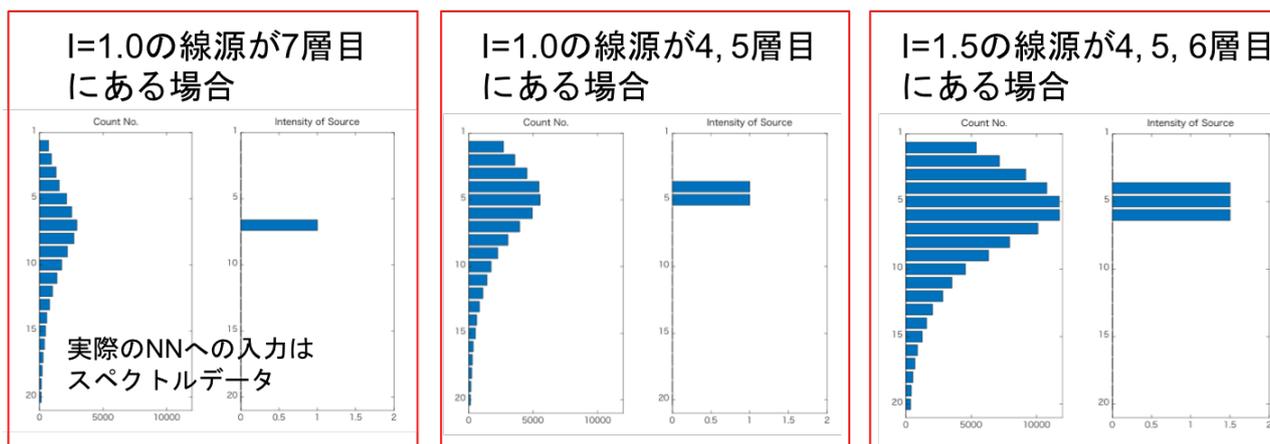


図(1)-13 深層学習ニューラルネットワークを用いた学習体系の全体像

DLNNの構造は、2層の積層自己符号化器と2層の階層型ニューラルネットワークを組み合わせたものとした(図(1)-14)。積層自己符号化器は、線源の位置と強度に関する特徴量を抽出する役割があり、階層型ニューラルネットワークは、抽出した特徴量と線源の位置と強度を学習および判定する役割がある。本研究では、入力データが20480個であり、DLNNを通過したデータは最終的に20個の出力データのようにデータの次元数が圧縮される。機械学習では、各層をつなぐ信号伝達経路には重み付け係数が割り当てられており、学習により重み付け係数が最適な係数に更新されていく学習方式である。中間層(2層目および3層目)のデータ数は任意の数に設定が可能であるが、本検討では復元可能なデータ数を経験的に求め、それぞれ1024個および256個と設定して検討した。

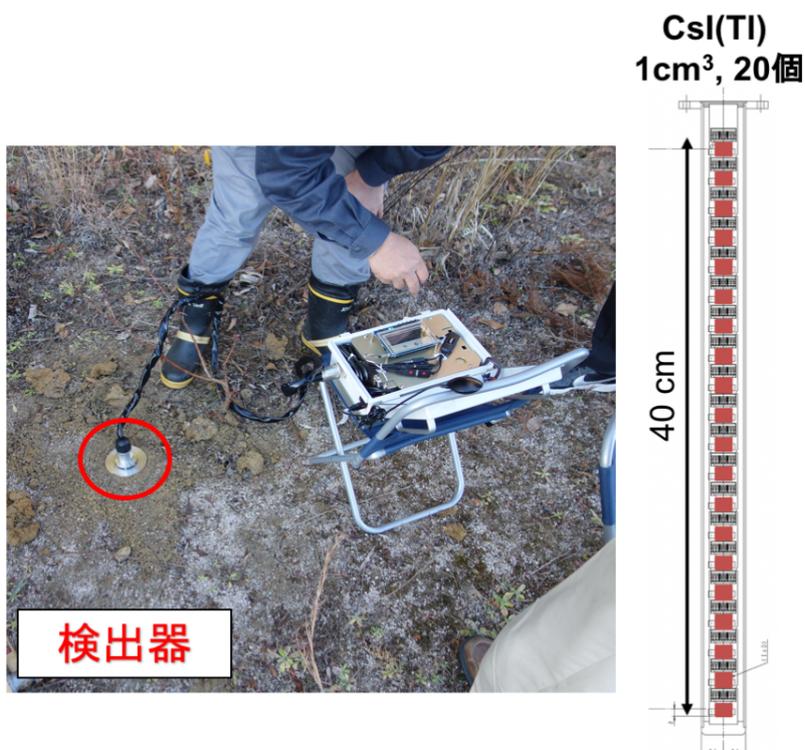


図(1)-14 構築した深層学習ニューラルネットワークの概要

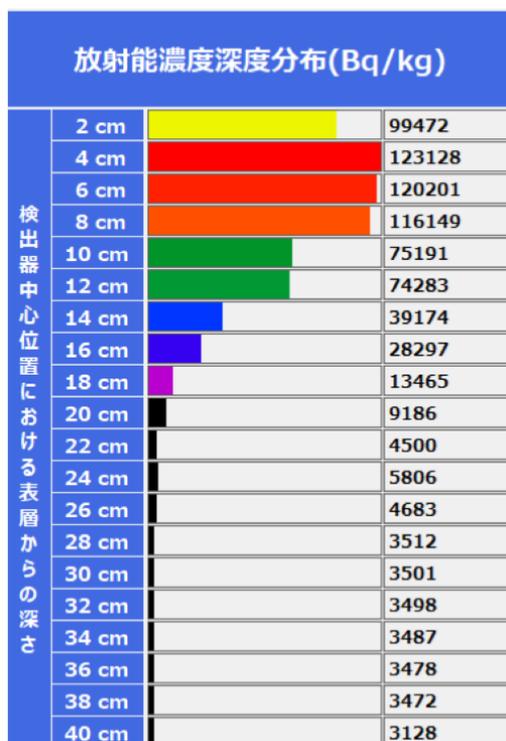


図(1)-15 PHITS計算において作成した学習データの一例

構築したDLNNの学習効果を評価するため、過去に学習のために使用した1710個のデータを使用して検証した(図(1)-15)。その結果、誤差率が±20%以内とした場合の正答率は99.94% (1709/1710) であり、学習に使用したデータに対しては、十分に学習できている結果であった。一方、未学習(未知)のデータに対する正答率は誤差率が±20%以内とした場合において74.56% (1275/1710) であった。本学習システムを多チャンネル放射能深度分布測定器に実装して得られた結果の一例を図(1)-16(a)および(b)に示す。今後、DLNNの精度を向上させることが必要であり、実測データを高い精度で再現可能なシミュレーション体系の構築と十分な学習データ数の確保が必要であることを確認した。DLNNの精度向上を効率よく実施する方法として、汚染土壌が存在する深度は土壌質に大きく依存するが、表層よりおよそ15 cmの範囲であることがこれまでの現地調査結果から明らかとなっている。そのため、深度40 cmの広い範囲で均等数に学習データを作成するのではなく、深度15 cmの範囲を中心として学習データを作成して学習の効率化を図ることを検討する。



図(1)-16(a) 作成測定器の設置現場写真とその深度方向の構造



図(1)-16(b) 現場測定で得られた放射能濃度深度分布図の一例

## 5. 本研究により得られた成果

### (1) 科学的意義

棒状の測定器（20個の独立した検出部）を用いた一次元計測から先端技術であるAIを放射能計測分野に取り入れて三次元計測を可能とした。これにより、検出器部に遮蔽板などを設置する必要がなく、コンパクト（検出部直径：30 mm、長さ：400 mm）な計測システムを構築すること可能であった。加えて、現場において放射性セシウムの深度分布調査を土壤中の放射能濃度に依存して10～30分程度で完結することが可能であった。これは、従来のスクレーパープレートを用いた方法では1週間程度を要していたが、本研究成果により飛躍的に効率性の向上を図ることができた。

これまで類似の深度分布測定器がJST・富士電機により開発されているが、現場で計測が完了するが土壌の採取が必要である。加えて、総重量が97 kgであり、移動には専用の車が必要となり測定場所が限定される。本申請研究で提案する可搬型深度分布測定器は5 kg程度であるため車載移動させる必要がなく、山岳部、地盤の緩い農地およびため池底などでの測定が可能である。加えて、業務従事者から一般市民までの使用を想定したソフトウェア開発を行うことにより、現場のあらゆるニーズに迅速に対応することが可能となる。

本研究で開発した三次元計測技術は、除去汚染土壌を適性管理するために利用が見込める。これまで、空間線量率測定用のモニタリングポストは存在したが、土壌に対するモニタリングシステムは提案されていない。本技術を基盤としたシステムを開発することにより、IAEA等の国際機関が求める除去汚染土壌管理の適正化が図れる。

### (2) 環境政策への貢献

#### <行政が既に活用した成果>

特に記載すべき事項はない。

#### <行政が活用することが見込まれる成果>

モンテカルロシミュレーションおよびディープラーニングニューラルネットワークを駆使して開発した三次元放射能濃度計測技術は、除去汚染土壌用のモニタリングシステムに応用することが可能な技

術である。本技術を基盤としたモニタリングシステムを開発することにより、中間貯蔵施設や埋立て処分場などにおいて、除去汚染土壌の直下にある土壌・地下水をリアルタイムに直接計測可能となり、管理の適正化を図ることができる。

任意の現場で深度分布調査を完結でき除染作業で実施されている表土の剥ぎ取り厚の適切なコントロールが可能となり、過剰な剥ぎ取りや剥ぎ取り不足を抑止でき、除染の効率化や減容化を図ることができる。また、天地返し後の農地再開時および住民の帰還に際しては、適切に土壌の入れ替えが実施されているか、宅地内が適切に除染されているかを住民自身で確認することができ、住民の不安解消に寄与する。

## 6. 国際共同研究等の状況

特に記載すべき事項はない。

## 7. 研究成果の発表状況

### (1) 誌上発表

#### <論文(査読あり)>

- 1) Sakama M, Fujimoto K, Inoue K, Fukushi M, Imajyo Y, Fukuhara T, Matsuura M, Yajima M, Endo M, Fujisawa M, Matsumoto E. Radiation Protection Dosimetry (2019) Development of In-situ multiple-channel depth distribution spectrometer to determine specific radioactivities of each targeted underground soil layer by PHITS newly incorporated into DLNN algorithm. (in press)

#### <その他誌上発表(査読なし)>

特に記載すべき事項はない。

### (2) 口頭発表(学会等)

- 1) Sakama M, Fujimoto K, Inoue K, Fukushi M, Imajyou Y, Fukuhara T, Matsuura M, Yajima T, Fujisawa M, Matsumoto E: 9th International Conference on High Level Environmental Radiation Areas (2018)  
Development of In-situ multiple-channel depth distribution spectrometer to determine specific radioactivities of each targeted underground soil layer by PHITS newly incorporated into DLNN algorithm.
- 2) 阪間稔、藤本憲市、井上一雅、福土政広、荒井萌子、今城裕介、福原隆宏、遠藤倫崇、松浦貢、矢島辰雄、松本(川口)絵里佳、井原智也、井本尚吾、佐藤隆文：第14回PHITS研究会/講習会(2018)  
PHITSと深層学習(DLNN)を組み合わせた多チャンネル放射線検出器の新しい放射線強度弁別処理技術の試み
- 3) 阪間稔、藤本憲市、井上一雅、福土政広、荒井萌子、今城裕介、福原隆雄、松浦貢、矢島辰雄、松本絵里佳：日本保健物理学会第50回研究発表会(2017)  
PHITSとDLNNを組み合わせた新しい放射能強度決定の試み：In-situ多チャンネル放射能濃度深度分布測定器の開発
- 4) 阪間稔、藤本憲市、松本絵里佳、井上一雅、福土政広、今城祐介、福原隆宏、松浦貢：第12回PHITS定期講習会/研究会(2016)  
PHITSとDLNNを組み合わせたIn-situ多チャンネル放射能濃度深度分布測定の放射能濃度決定への取り組み
- 5) 阪間稔、藤本憲市、松本絵里佳、井上一雅、福土政広、今城祐介、福原隆宏、松浦貢：プラズマシミュレータシンポジウム(2016)

PHITSとDLNNによる放射能濃度深度分布測定に関わる検出効率シミュレーションの試み

**(3) 知的財産権**

- 1) 井上一雅、福土政広、阪間稔、藤本憲市：首都大学東京；「放射線測定器」、特願2017-247979、平成29年12月25日

**(4) 「国民との科学・技術対話」の実施**

- 1) 首都大学東京オープンキャンパス（平成28年8月8日、参加者約250名）にて成果紹介
- 2) 首都大学東京オープンキャンパス（平成29年8月8日、参加者約250名）にて成果紹介
- 3) 首都大学東京オープンキャンパス（平成30年8月7日、参加者約250名）にて成果紹介

**(5) マスコミ等への公表・報道等**

特に記載すべき事項はない。

**(6) その他**

特に記載すべき事項はない。

**8. 引用文献**

特に記載すべき事項はない。

### III. 英文Abstract

## **Practical Application of Multi-channel Radioactivity Depth Distribution Measuring System and Establishment of Its In-situ Measurement Technique**

Principal Investigator: Kazumasa Inoue

Institution: Tokyo Metropolitan University (TMU)

7-2-10, Higashiogu, Arakawa-ku, Tokyo 116-8551, JAPAN

Tel: +81-3-3819-1211 / Fax: +81-3-3819-1406

E-mail: kzminoue@tmu.ac.jp

Cooperated by: Tokushima University, Kagawa University

### [Abstract]

**Key Words:** Depth distribution of activity concentration, Radioactive cesium, In-situ measurement, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, Deep learning, Monte Carlo simulation

The rationalization of decontamination work for contaminated soil that occurred due to radionuclide releases in the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident is required. Since the depth distribution of radiocesium differs depending on the soil types and topography, the optimization of stripping thickness of soil is needed and the information for this can be obtained through depth distribution measurement. Optimization that it possible to lower both the cost for decontamination work and the volume of removed soils. However, the current depth distribution measurement utilizes a scraper plate to collect soil samples which are then measured in a laboratory. This means one week is spent in obtaining results. In this study, a multi-channel radioactivity depth distribution measuring system that can obtain results in-situ without soil collection is being developed.

A detector equipped with 20 CsI(Tl) scintillators was constructed which was able to measure radioactivity depth distribution to 40 cm depth in a one-time measurement. A multilayered neural network (NN) was used to convert from count rate to activity concentration. The machine learning was carried out using data obtained by a multi-channel radioactivity depth distribution measuring system and simulation data as input data and data obtained from the scraper plate technique and simulation data as output data. When unknown measurement data were inputted into the system, the accurate activity concentration could be provided. The validity of this system was estimated to be 74.56% when the error range was set to  $\pm 20\%$ . The time spent in measuring the radioactivity depth distribution could be reduced to 30 min by using the multi-channel radioactivity depth distribution measuring system. In the future, it is expected that rationalization of decontamination work and work for the interim storage facilities for contaminated removed soils will be possible based on the findings of this research.