

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04646

研究課題名（和文）機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析に基づく核種判定

研究課題名（英文）Radioisotope Identification by gamma-ray spectrum analysis using Machine-Learning Models

研究代表者

木村 祥紀（Kimura, Yoshiki）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・核不拡散・核セキュリティ総合支援センター・研究職

研究者番号：60636869

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、核セキュリティ事象の現場初動対応で使用する放射性核種判定装置の開発を目指し、人工ニューラルネットワーク（ANN）モデルを使用したガンマ線スペクトルの解析に基づき自動的に放射性核種を判定する核種判定アルゴリズムを提案した。検出器シミュレーションで構築した模擬スペクトルデータセットで学習したANNモデルを使用した核種判定アルゴリズムを構築し、高エネルギー分解能及び低エネルギー分解能を有する携帯型ガンマ線検出器で測定したスペクトルに対して、非常に高い性能で人工放射性核種を判定できることを実証した。また、本手法がウラン核種の検知や濃縮度によるウラン分類にも有効であることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、機械学習モデルによるガンマ線スペクトル解析の応用技術として、人工ニューラルネットワークモデルを使用した核種判定アルゴリズムの有効性が示された。また、ガンマ線スペクトル解析に用いる機械学習モデルの学習データセットとして、検出器シミュレーションで構築した模擬スペクトルが有効であることを実証した。本研究で開発した核種判定アルゴリズムは核セキュリティ事象等の初動対応における原因核種特定を支援する放射性核種判定装置の開発を最終目標としたものであり、本研究の成果を元にこの目標を達成する装置の実現が期待でき、本技術は核セキュリティ事象初動対応以外の分野においても応用が期待されるものである。

研究成果の概要（英文）：A radioisotope identification algorithm that automatically determines radioisotopes based on the gamma-ray spectrum analysis using an artificial neural network (ANN) model was proposed in this research. The ANN models were trained by spectra data set constructed by detector simulations, and it was demonstrated that the algorithm can identify the artificial radioisotopes with very high performance for the gamma-ray spectra actually measured by portable gamma-ray detectors with high and low energy resolutions. In addition, it was demonstrated that the present algorithm can be used for the identification of uranium materials and classification of uranium enrichment.

研究分野：核セキュリティ・核不拡散

キーワード：核セキュリティ 機械学習 核種判定 ガンマ線スペクトル解析

## 1. 研究開始当初の背景

近年、規制外の核物質やその他放射性物質に関連する犯罪行為や核・放射線テロ行為といった核セキュリティ事象の脅威が国際的な懸念事項になっている。特に我が国においては、国際的な大規模公共イベントの開催を控え、核セキュリティ事象を含むテロ行為への対応能力整備が進められている。核セキュリティ事象の現場では、現場初動対応者の被ばくリスク低減やすみやかな事後対応のために、原因となる核物質・放射性物質を迅速に把握することが必要不可欠となる。また、核セキュリティ事象は一般的な原子力災害と比較して公衆と放射能が直接的に接触する可能性が高く、事象把握に一層の迅速性が求められる。

核セキュリティ事象の現場で原因核種を特定するための資機材として、ガンマ線検出器を使用したハンドヘルド型核種判定装置 (Radioisotope Identification Device: RIID) が広く使用されている。RIID による放射性核種の判定にはガンマ線スペクトルから核種特有のピークエネルギーとピーク面積の解析が必要となるが、検出器コストと放射線検出感度の関係から市販されているハンドヘルド型 RIID では低エネルギー分解能の検出器が使用されているものが多く、判定できる核種が少ない、精度が著しく低い等、核種判定性能が限定的となってしまう技術的な課題が存在している。一方、実験室で使用される高純度ゲルマニウム検出器 (HPGe) はエネルギー分解能が高く核種判定精度が高いが、冷却が必要、価格が非常に高価であるなどの理由から、初動対応現場で普及していない。安価なハンドヘルド型 RIID を使用して精度の高い核種判定を行うためには、放射線測定やスペクトル解析などに関する十分な経験と高度な知識が必要となるが、核セキュリティ事象の初動対応者にこれらを習得させることは困難である。

近年、サンプルとなる学習データを入力として有用な特徴や判断基準などを抽出し、人間の学習能力や経験則に基づく高度な異常検知や分類・判断といった機能をコンピュータ上で実現する機械学習モデルを使用した技術が幅広い分野で応用されている。学習データから抽出した情報をもとに分類問題などのタスクを行うという機械学習の特性において、複雑な放射線スペクトル解析をもとにした核種判定に対して有用性が非常に高いと考えられ、機械学習モデルをガンマ線スペクトル解析に適用することで、従来よりも精度の高い核種判定を迅速かつ自律的に行うことができるハンドヘルド型の RIID を実現することが可能であると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、核セキュリティ事象の現場初動対応活動を支援する技術として、放射性核種の判定を迅速かつ自律的に行うためのハンドヘルド型放射性核種判定装置 (RIID) の開発を最終目標とした、機械学習モデルを応用したガンマ線スペクトル解析に基づく核種判定アルゴリズムの開発を目的とする。

## 3. 研究の方法

- (1) 機械学習モデルを応用したガンマ線スペクトル解析における重要な技術的な課題として、モデルに学習させるスペクトルデータセットの構築が挙げられる。膨大なパターンの放射性核種の組み合わせをカバーした測定スペクトルを準備することは現実的に非常に困難であることから、本研究では検出器シミュレーションにより様々な条件下での模擬ガンマ線スペクトルを構築する方法を検討した。
- (2) 次に、人工ニューラルネットワーク (Artificial Neural Network: ANN) モデルを使用した核種判定アルゴリズムを開発する。また、検出器シミュレーションで構築した模擬スペクトルデータセットによって学習させた ANN モデルを使用したアルゴリズムの有効性評価として、高エネルギー分解能を持つ HPGe 検出器による測定ガンマ線スペクトルを対象とした核種判定性能の評価を行う。
- (3) 低エネルギー分解能検出器による測定ガンマ線スペクトルにおける核種判定を行うアルゴリズムとして、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) モデルを使用したアルゴリズムを開発し、性能評価を行った。

## 4. 研究成果

- (1) モンテカルロ法による光子輸送計算を含む検出器におけるガンマ線に起因する計数パルス発生のシミュレーションを行うことが可能な MCNP コード (Werner et al., LA-UR-18-20808) を使用し、模擬ガンマ線スペクトルデータセットの体系的な構築手法を開発した。本手法では、MCNP コードにより単一エネルギーガンマ線に対する検出器応答関数のシミュレーションを行い、検出器応答関数と放射性核種の崩壊ガンマ線エネルギー及びその強度を組み合わせることで、様々な核種の組み合わせ条件で測定した場合の模擬ガンマ線スペクトルデータセットを構築する (木村, 土屋, INMMJ 第 40 回年次大会)。本手法により、膨大な条件下での模擬スペクトルを個々にシミュレーションで作成する方法と比較して、高速に模擬スペクトルデータセットの構築が可能となり、機械学習モデルの学習データセットの構築における計算資源の大幅な節約が可能となる (図 1)。

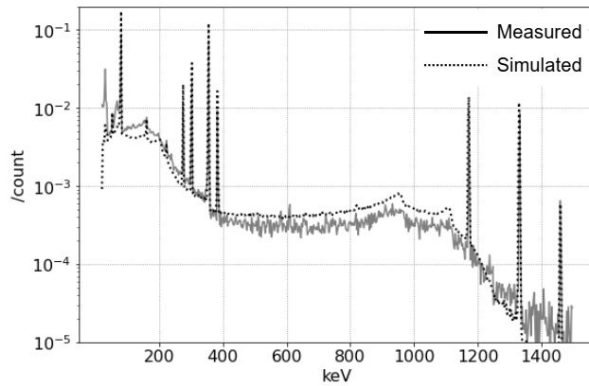


図 1 : HPGe 検出器による標準線源の測定スペクトルと模擬スペクトルの比較

(2) ANN モデルを使用した核種判定アルゴリズムとして、測定スペクトルの対象エネルギー領域 (Region of Interest: ROI) における放射性核種各々に起因する計数寄与率 (Count Contribution Ratio: CCR) を ANN モデルで回帰推定し、CCR 推定値の相对比较に基づいて核種判定を行うアルゴリズムを開発した (図 2)。高エネルギー分解能の HPGe 検出器で測定したガンマ線スペクトルを対象とした核種判定アルゴリズムとして、人工放射性核種 5 核種 ( $^{57}\text{Co}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ) 及び  $^{235}\text{U}$ 、自然由来放射性核種 ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) を含む計 10 核種を対象核種とし、全結合 ANN モデルを使用した CCR の回帰推定に基づき核種判定を行うアルゴリズムを開発し、携帯型 HPGe 検出器で標準放射線源及びウラン標準線源等を測定したガンマ線スペクトルにおける核種判定性能の評価を行った。その結果、非常に高い性能で人工放射性核種を判定することが可能であり (表 1)、ウラン標準線源やウラン精鉱試料を測定したガンマ線スペクトルにおいても  $^{235}\text{U}$  を検知できることを確認した (図 3 (a)、木村, 土屋, INMMJ 第 40 回年次大会)。また、本研究で開発した ANN モデルによる CCR 推定値が、ウラン濃縮度の分類にも有効であることを確認した。以上により、本研究で提案する模擬スペクトルデータセットで学習させた ANN モデルを使用したガンマ線スペクトル解析と、CCR 推定値による核種判定アルゴリズムの有効性を確認した。

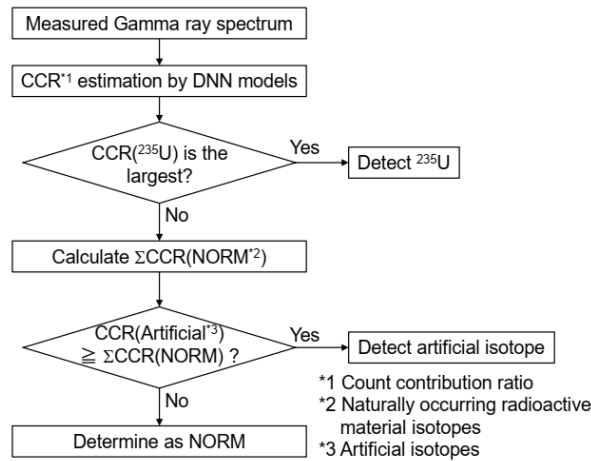


図 2 : 本研究で提案する核種判定アルゴリズムのフロー

表 1: 人工放射性核種の判定性能評価結果

| 検出器     | モデル    | Precision | Recall | F-score |
|---------|--------|-----------|--------|---------|
| HPGe    | 全結合ANN | 1.000     | 0.864  | 92.68   |
| HPGe    | CNN    | 1.000     | 1.000  | 100.0   |
| HPGe    | 従来法    | 0.735     | 1.000  | 84.75   |
| CsI(Tl) | 全結合ANN | 0.722     | 0.520  | 60.47   |
| CsI(Tl) | CNN    | 0.958     | 0.920  | 93.88   |
| CsI(Tl) | 従来法    | 0.882     | 0.600  | 71.43   |

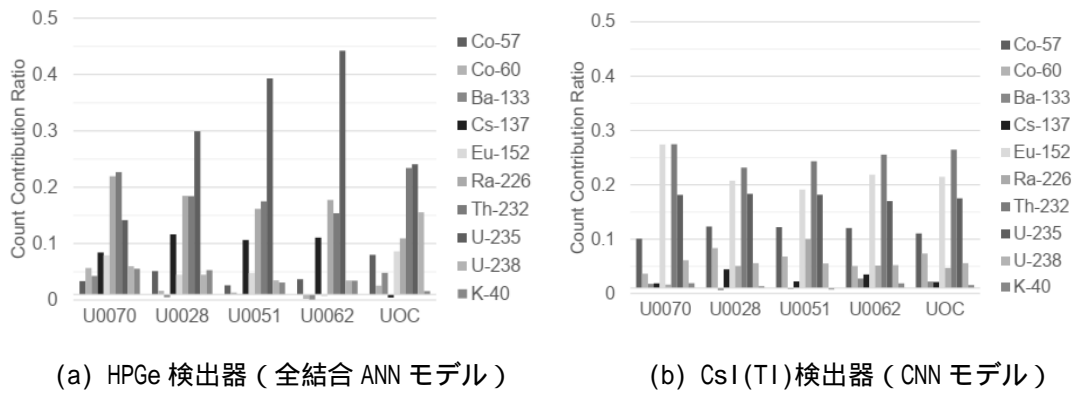


図 3: ウラン試料の測定スペクトルに対する CCR 推定結果

(3) 低エネルギー分解能のヨウ化セシウム (CsI(Tl)) 検出器で測定したガンマ線スペクトルを対象とした核種判定アルゴリズムとして、前述の 10 核種を対象核種とし、CNN モデルで回帰推定した CCR に基づき核種判定を行うアルゴリズムを開発し (木村, 土屋, AESJ2021 年春) 携帯型 CsI(Tl) 検出器で標準放射線源及びウラン標準線源等を測定したガンマ線スペクトルにおける核種判定性能の評価を行った。本アルゴリズムで使用するモデルは、光学画像認識で実績のある VGG-ILSVRC モデル (Simonyan, et al., ICLR2015) を 1 次元信号データであるガンマ線スペクトルの解析に適用した CNN モデルとなっており、畳み込み層を複数含む深層構造のモデルを使用することで、低エネルギー分解能の CsI(Tl) 検出器で標準ガンマ線源を測定したガンマ線スペクトルにおいて、非常に高い性能で人工放射能核種を判定することが可能であることを確認した (表 1)。一方、ウラン試料を測定したガンマ線スペクトルに対しては、畳み込み層における特徴量抽出が不十分であるなどの要因により  $^{235}\text{U}$  を正しく検知することができなかったことから (図 3 (b))、今後の課題として、より深い構造を有する ANN モデルの使用や、複数の ANN モデルによるアンサンブル法を使用したアルゴリズムについて今後検討が必要である。

以上により、本研究で提案する ANN モデルを使用したガンマ線スペクトル解析と、CCR 推定値による核種判定アルゴリズムの有効性を確認するとともに、ガンマ線スペクトル解析に適用する ANN モデルの学習において検出器シミュレーションで構築した模擬スペクトルデータセットが有効であることを確認した。本研究で開発した核種判定手法は、従来のピーク検知・ピーク面積の解析及び核種データライブラリ照合に基づく核種判定手法 (原子力規制庁 放射能測定法シリーズ No.7 他) と比較しても非常に高い性能で核種判定を行うことが可能である (表 1)。本研究で提案する ANN モデルで回帰推定する CCR は ROI 全体におけるガンマ線計数を反映している点が特徴的であり、ガンマ線に起因する光電ピークのみならずコンプトン散乱部分なども含む情報を自動的に解析し、各核種に起因する計数寄与率という形式で出力することが可能 (図 3) となる。これにより、本研究で想定しているガンマ線スペクトル解析に関する経験・知識が不十分なユーザーにおいても、アルゴリズムによる核種判定結果の解釈が非常に容易になると考えられる。なお、これらの成果は現在論文としてまとめている。また、本研究で提案した ANN モデルを使用したガンマ線スペクトル解析手法に関しては、本研究の目的である核セキュリティ事象初動対応のみならず、あらゆる目的のガンマ線スペクトル解析に応用が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>土屋兼一   |
| 2. 発表標題<br>核セキュリティを支える核鑑識の実施能力整備に向けた技術開発と今後の課題～初動対応を中心に～      |
| 3. 学会等名<br>日本核物質管理学会と日本原子力学会核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会との合同研究会（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>木村祥紀   |
| 2. 発表標題<br>核鑑識技術開発の現状と今後の課題                                   |
| 3. 学会等名<br>日本核物質管理学会と日本原子力学会核不拡散・保障措置・核セキュリティ連絡会との合同研究会（招待講演） |
| 4. 発表年<br>2019年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>木村祥紀、土屋兼一   |
| 2. 発表標題<br>核セキュリティ事象初動対応のための機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析 - 検出器シミュレーションによる学習データの構築及び核種判定アルゴリズムにおける有用性の検討 - (最優秀論文賞受賞) |
| 3. 学会等名<br>第40回日本核物質管理学会年次大会   |
| 4. 発表年<br>2019年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>Yoshiki Kimura, Ken'ichi Tsuchiya, Ayako Okubo, Kosuke Tanabe, Hidetoshi Kakuda, Norimitsu Akiba, Hirofumi Tomikawa                             |
| 2. 発表標題<br>Development of Nuclear Security Technologies for Response on Material Out of Regulatory Control Event and Nuclear Forensics Activities in Japan |
| 3. 学会等名<br>IAEA International Conference on Nuclear Security: Sustaining and Strengthening Efforts   |
| 4. 発表年<br>2020年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>木村祥紀、土屋兼一   |
| 2. 発表標題<br>核セキュリティ初動対応支援のための深層ニューラルネットワークモデルによる核種判定アルゴリズムの開発 |
| 3. 学会等名<br>日本原子力学会2021年春の年会                                  |
| 4. 発表年<br>2021年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

技術紹介-核セキュリティ事象初動対応のための機械学習を応用したガンマ線スペクトル解析-  
[https://www.jaea.go.jp/04/iscn/np\\_news/attached/0274.pdf#page=17](https://www.jaea.go.jp/04/iscn/np_news/attached/0274.pdf#page=17)

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                         | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                       | 備考            |
|-------|---|---|---------------|
| 研究分担者 | 土屋 兼一<br><br>(Tsuchiya Kenichi)<br><br>(90447920) | 科学警察研究所・法科学第二部・主任研究官<br><br><br><br>(82505) | 削除：2020年3月18日 |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

|         |         |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|