# 非指向性検出器を用いた面状線源モデル化による 放射線源分布推定

泉子恒<sup>\*1</sup>,小松廉<sup>\*1</sup>,禹ハンウル<sup>\*1</sup>, 田村 雄介<sup>\*2</sup>山下 淳<sup>\*1</sup>,淺間一<sup>\*1</sup>

# **Radiation Distribution Estimation with Non-directional Detector**

# **Using Plane Source Model**

Ziheng Chao<sup>\*1</sup>, Ren Komatsu<sup>\*1</sup>, Hanwool Woo\*1, Yusuke Tamura<sup>\*2</sup>, Atsushi Yamashita<sup>\*1</sup>, and Hajime Asama<sup>\*1</sup>

 \*1 Undergraduate and School of Engineering, The University of Tokyo 7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan
\*2 School of Engineering, Tohoku University
6-6-01, Aramaki Aza Aoba Aoba-ku, Sendai, Miyagi, Japan

The Fukushima Daiichi nuclear disaster occurred in the Great East Japan Earthquake. Inside the reactor, the material with high radioactivity scattered thoroughly, causing a severe condition, which requires a small number of measurement spots to use the detector. We propose a new system based on a plane model under several constraints to use fewer measurement spots and make less estimating error. We estimate the radiation source distribution using the maximum likelihood estimation method optimized by gradient descent. As a result, it is found that the proposed system performs less error than the previous system, with a limited number of measurement spots.

*Key Words* : radiation source distribution mapping; maximum likelihood estimation; iterative algorithm; non-directional detector

### 1. 緒 言

近年,放射性物質に関する研究は災害救援,テロ対 策の領域で多く行われている.中でも,2011年に起き た福島第一原子力発電所事故が世界の関心を集めてい る. 福島第一原子力発電所事故において特に原子炉の 被害は莫大であり、図1に示すように、原子炉2号機 の圧力容器(RPV)でメトルダウンが起こり、核燃料 の一部がペデスタルの底部に溶け落ちている.また, 水蒸気爆発により高放射能を持つ放射性物質が壁側に も付着している. これらの高放射能物質によりペデス タル内部は高線量環境になっており,福島第一原子力 発電所の廃止措置は非常に困難を極める. そこで, 廃 止措置の1つの取り組みとして、ペデスタルから放射 性物質を取り出すことが期待されている. 高放射能物 質の取り出しの前過程として、まず、ペデスタルの内 部状況を明らかすことが必要である.とりわけ、放射 線源の分布状況を把握することは極めて重要である. 放射線源の分布状況を把握するために、一般的に放



Fig. 1 Schematic of Fukushima Daiichi nuclear reactor plant unit No.2

射線検出器が用いられる.放射線検出器は主に指向性 検出器と非指向性検出器の2種類がある.指向性検出 器は,放射線の方向とカウント数を両方取得できる機 器で,具体的には、コンプトンカメラ<sup>(1)</sup>,TimePix<sup>(2)</sup>, ガンマイメージャ<sup>(3)</sup>などがある.しかし,高線量環境 においては,放射線の方向を取得できないという問題 点があるため,高線量環境であるペデスタル内におい ては、カウント数のみを取得できる非指向性検出器を

<sup>\*1</sup> 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8654東京都文京区本 郷 7-3-1) chao@robot.t.u-tokyo.ac.jp

<sup>\*2</sup> 東北大学大学院工学研究科(〒 980-8579 仙台市青葉区荒巻 字青葉 6-6)

使用することが望ましい.

非指向性検出器を用いた放射線源分布推定も数多く 提案されている<sup>(4)(5)</sup>. 非指向性検出器を用いた放射線 源分布推定においては, 1つの計測点からは放射線源 の方向情報が得られないため,指向性検出器を用いた 手法と比較するとより多くの箇所で計測する必要があ る<sup>(6)(7)</sup>. 皆本ら<sup>(6)</sup>は非指向性検出器の1つである GM 管を用いて,複数の計測点で取得したカウント数に基 づき,複数存在する点状放射線源の分布を推定した. 皆本らは,推定モデルを構築する際に,グリッドベー スを採用し,放射線源が存在しそうな2次元エリアを 同じ大きさのグリッドに切り分け,各グリッドの中心 に点線源が存在すると仮定した.

本研究においては,原子炉内部の高放射線環境にお ける線源分布推定を対象にする.したがって、放射線 検出器を長時間に使用すると,大量ノイズの発生,検 出器の故障まで至る恐れがある.よって、より少ない 計測点で放射線源分布が可能であることが期待される. グリッドベースにおいては、少ない計測点によって得 られる放射線カウント数情報が減るため、それに応じ てグリッドの数を減らすことで, 推定過程を安定させ るのは1つの選択肢である. さらに, 推定されるエリ ア以外のところから由来する環境線量が高い場合では、 検出器をエリアにできるだけ近づけることが考えられ る. また、これまで多く議論されてきた点状の放射線 源<sup>(4)~(6)</sup>と違うより現実に近い面状の放射線源を考え る必要がある.以上より、本研究は、「グリッド数が少 ない、検出器がエリアに近い、エリアに面状放射線源 が存在する」3つの拘束条件のもとで、少ない計測点 で放射線源分布推定が達成できるためのモデルを提案 することを目的にする.

## 2. 問題設定及びモデルディング

2.1 放射線源と検出器における数学モデル ま ず,従来研究<sup>(4)~(6)</sup>が使用した点状線源モデルを従来手 法とし,本研究の面状線源モデルを提案手法として, 両手法の違いを述べる.あるエリアで放射線源が満遍 なく分布していることを想定する.そして,エリアを 同じ大きさのグリッドに切り分ける.放射線検出器を 用いて,ある計測点で放射線のカウント数*b* [cps] を 取得する.従来手法では,検出器で取得されたカウン ト数と1つのグリッド中心の放射線源強度*q* [Bq] の関 係式が次式で与えられる:

$$b = e^{\mu d} \frac{cq}{4\pi d^2}.$$
 (1)

ここで、cが検出器の係数、 $d = ||x_q - x_d||$ が検出器位置 $x_d$ とグリッド中心 $x_a$ の距離、 $\mu$ が放射線の減衰係



# Fig. 2 Difference of model between previous system and proposed system

数である. 図 2(a) に示すように,単位グリッドの大き さが大きくて,検出器がグリッドに近いとの拘束条件 のもとで,1つのグリッドが面状の放射線源に満ちい ているのに対して,面積を持つ面状放射線源をグリッ ドの中心の1点に集中させて近似をするモデルが精確 ではない.したがって,グリッドの面積要素を取り入 れて考慮する必要がある.そこで,図 2(b) に示すよ うに,本研究は1つのグリッドが同一強度の微小面積 線源の強度を式(1) に適用し,次式で与えられる:

$$\Delta b = e^{\mu d} \frac{cq\Delta S}{4\pi d^2}.$$
 (2)

ここで, *q* が強度密度,単位が Bq/m<sup>2</sup> である.式(2) を積分すると,単位グリッド *S* の強度と検出器で取得 したカウント数の関係式が次式で与えられる:

$$b_{total} = \int_{S} e^{\mu d} \frac{cq}{4\pi d^2} dS.$$
(3)

式(1)と式(3)を比較すると、従来手法より、提案手 法は1つグリッド内のすべての微小線源と計測点の位 置関係を考慮しているため、より線源のモデルを精確 に表すことができる.

2.2 計測システムにおける数学モデル 本研究 では、放射線源分布が推定されるエリアを *M* 個の同 じ大きさのグリッドに切り分ける<sup>(6)(8)</sup>. ここで、各グ リッド *S<sub>j</sub>* で強度密度 *q<sub>j</sub>* の面状放射線源が存在すると 仮定する.計測点 *i* で取得したカウント数 *b<sub>i</sub>* が次の式 で与えられる<sup>(6)</sup>:

$$b_{i} = \sum_{j=1}^{M} \int_{S_{j}} e^{\mu d_{ij}} \frac{cq_{j}}{4\pi d_{ij}^{2}} dS, \qquad (4)$$

 $A_{ij} = \int_{S_j} e^{\mu d_{ij}} \frac{c}{4\pi d_{ij}^2} dS$ とし、 $b_i$ が次式で書き換えられる:

$$b_i = \boldsymbol{A}_i \boldsymbol{q} + b_{bg}, \tag{5}$$

ここで、 $b_{bg}$ がエリア以外の環境線量、 $q = [q_1, q_2, ..., q_j, ..., q_M]^T$ である.また、計測点の数を Nとすると、すべての計測点で得られるすべてのカ ウント数が次式で与えられる:

$$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{q}, \tag{6}$$

ここで,  $\boldsymbol{b} = [b_1, b_2, ..., b_i, ..., b_N]^T$ , また,

$$\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} A_{11} \ A_{12} \ \dots \ A_{1M} \\ A_{21} \ A_{22} \ \dots \ A_{2M} \\ \vdots \ \vdots \ A_{ij} \ \vdots \\ A_{N1} \ A_{N2} \ \dots \ A_{NM} \end{bmatrix}$$
(7)

である.本研究では問題を簡単化するために,放射線の 減衰と環境線量を考慮しない,よって,μ = 0,b<sub>bg</sub> = 0 である.

**2.3 最尤推定に基づく放射線源分布推定** 式(6) に基づき,放射線源分布推定問題を計測したカウント 数 *b* から放射線源強度密度 *q* を推定する逆問題を解決 することに転換することができる.最尤推定は事前情 報が不要で,簡単に実装できる特徴を有し,推定手法 として使われている<sup>(9)</sup>.ここで, *q̂* を尤度関数 *L*(*b*|*q*) を最大化する強度密度に設定する<sup>(6)(9)(10)</sup>:

$$\hat{\boldsymbol{q}} = \arg\max_{\boldsymbol{q}} L(\boldsymbol{b}|\boldsymbol{q}).$$
 (8)

2.4 最適化手法 再急降下法を最適化手法とし て使用する.再急降下法は一次微分可能関数の最適解 を求められる反復アルゴリズムで,更新式が次式で与 えられる<sup>(6)</sup>:

$$\boldsymbol{q}^{(k+1)} = \boldsymbol{q}^k + \boldsymbol{\alpha} \bigtriangledown g(\boldsymbol{q}^{(k)}). \tag{9}$$

ここで、kが更新ステップ、 $\alpha$ が収束速度を決めるステップ幅、 $\bigtriangledown g(\boldsymbol{q}^{(k)})$ が勾配ベクトルである.

### 3. シミュレーション結果

**3.1 シミュレーションメソッド**本研究は Geant4<sup>(11)</sup>をシミュレーションメソッドとして使用し, 非指向性検出器と放射線源を設置する. Geant4 は欧 州原子核研究機構が開発したモンテカルロメソッド



Fig. 3 2.4 m  $\times$  2.4 m plane-like source with different intensity density



Fig. 4  $11 \times 11$  measurement spots

を使用し,粒子が物質を通過する際の相互左右をシ ミュレーションするメソッドである.

本研究は CeBr<sub>3</sub>材のキューブ状のシンチレータタイ プ非指向性検出器を用いた,検出器の寸法が 50 mm× 50 mm×50 mm である.

**3.2 放射線源分布推定**本研究では、図3に示す ように、放射線源のエリアを2次元の寸法2.4 m×2.4 m の矩形にし、その上に平面状で、x 軸に沿ってサイン 関数に従う強度密度分布の線源を設置する.線源の元 素を<sup>137</sup>Cs にする.

次に,従来手法と提案手法を比較するために,放射 線源分布推定の誤差で両手法を評価する.誤差の指標 が次式のL1ノルムで与えられる:

$$\sum_{i=1}^{M} |t_i - q_i|, \tag{10}$$

ここで,  $t = [t_1, t_2, ..., t_M]$ が放射線源分布の強度密度の 真値,  $q = [q_1, q_2, ..., q_M]$ が放射線源分布の強度密度の 推定値.

本研究では、2.5 m×2.5 mの矩形エリアの垂直方向 から 60 mmの距離にある計測点群で検出器を配置す る.計測点の配置を垂直方向からの俯瞰図の図4に示 すように、x軸と y 軸方向それぞれ11×11 合計121 個の計測点を等間隔に配置する.

グリッドを12×12計144個にし,推定された放射 線源分布図が図5に示される.従来手法と比べて提 案手法は比較的にスムーズな推定結果を得られたこと



(a) Distribution estimation by the previous system in  $12 \times 12$  grids



(b) Distribution estimation by the proposed system in  $12\times12\ grids$ 

Fig. 5 Distribution estimation by different systems in  $12 \times 12$  grids

がわかった.また,L1ノルムで推定誤差を評価する と,従来手法が 48666 MBq/m<sup>2</sup> に対し,提案手法は 43960 MBq/m<sup>2</sup> で,比較的に小さな推定誤差を得られ たことがわかった.

# 4. 結 言

本研究は一定の拘束条件のもとで,面状の放射線源 に対して,従来の点状線源モデルの代わりに,新しい 面状線源モデルを提案した.Geant4のシミュレーショ ンメソッドを用いて,放射線源分布を推定した結果, 従来手法より提案手法は推定誤差が小さいことが確認 できた.将来の展望としては,より推定誤差の少ない 手法の提案や計測点の最適配置問題が上げられる.

### 謝 辞

本研究は,JAEA/CLADS による英知を結集した原 子力科学技術・人材育成推進事業の支援を受けた.

### 参考文献

(1) F. Cong, Y. Tamura, K. Shimazoe, H. Takahashi, J. Ota, and S. Tong, "Radioactive source recognition with moving compton camera imaging robot using geant4," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 953, p. 163108, 2020.

- (2) P. Štibinger, T. Báča, and M. Saska, "Localization of ionizing radiation sources by cooperating micro aerial vehicles with pixel detectors in real-time," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 5, no. 2, pp. 3634–3641, 2020.
- (3) D. Kim, H. Woo, Y. Ji, Y. Tamura, A. Yamashita, and H. Asama, "3d radiation imaging using mobile robot equipped with radiation detector," in 2017 *IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, pp. 444–449, 2017.
- (4) G. Cordone, R. R. Brooks, S. Sen, N. S. Rao, C. Q. Wu, M. L. Berry, and K. M. Grieme, "Improved multi-resolution method for mle-based localization of radiation sources," in 2017 IEEE 20th International Conference on Information Fusion, pp. 1–8, IEEE, 2017.
- (5) B. Deb, J. F. Ross, A. Ivan, and M. J. Hartman, "Radioactive source estimation using a system of directional and non-directional detectors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 58, no. 6, pp. 3281–3290, 2011.
- (6) G. Minamoto, E. Takeuchi, and S. Tadokoro, "Estimation of ground surface radiation sources from dose map measured by moving dosimeter and 3d map," in 2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1889–1895, IEEE, 2014.
- (7) N. S. Rao, M. Shankar, J.-C. Chin, D. K. Yau, S. Srivathsan, S. S. Iyengar, Y. Yang, and J. C. Hou, "Identification of low-level point radiation sources using a sensor network," in 2008 International conference on information processing in sensor networks, pp. 493–504, IEEE, 2008.
- (8) J. C. Chen, R. E. Hudson, and K. Yao, "Maximumlikelihood source localization and unknown sensor location estimation for wideband signals in the nearfield," *IEEE transactions on Signal Processing*, vol. 50, no. 8, pp. 1843–1854, 2002.
- (9) M. Morelande, B. Ristic, and A. Gunatilaka, "Detection and parameter estimation of multiple radioactive sources," in 2007 IEEE 10th International Conference on Information Fusion, pp. 1–7, IEEE, 2007.
- (10) B. Deb, "Iterative estimation of location and trajectory of radioactive sources with a networked system of detectors," *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 60, no. 2, pp. 1315–1326, 2013.
- (11) "Geant4." https://geant4.web.cern.ch/.