

[H27-9]

複数方向の放射線情報から構築する汚染分布の三次元可視化 Three-dimensional visualization of environmental distribution of radionuclide to reconstruct from the radiation information of plural directions

佐々木美雪*^{A)}, 眞田幸尚^{A)}, 澤幡浩之^{B)}, 石井慶造^{C)}
Miyuki Sasaki *^{A)}, Yukihiisa Sanada^{A)}, Hiroyuki Sawahata^{B)}, Keizo Ishii^{C)}
^{A)} Fukushima Environmental Safety center Japan Atomic Energy Agency
^{B)} School of Engineering, Tokyo University
^{C)} Department of Engineering, Tohoku University

Abstract

Since accident of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (FDNPS), some unmanned vehicle was applied for radiation measurement around the FDNPS. Japan Atomic Energy Agency (JAEA) is developing a radiation measurement method using a small multi-rotor helicopter (micro UAV) for measurement of radiation in the environment. The micro UAV is expected to be useful due to measuring the radiation distribution at small areas (such as personal residence area) easily. In the conventional method, there are some premises to convert from count rate to dose rate at 1 m above the ground (agl). 1) The dose rate at 1 m agl. is constant, 2) topography is a plane (plane source model) and 3) relationship of altitude and count rate are exponential correlation. Therefore, it is difficult that dose rate by airborne radiation measurement is precisely measured at the mountains and uneven place of dose rate by the conventional method. In addition, the influence of the radiation from a structure and tree on the ground is not ignored at the low altitude less than 50 m that micro UAV can fly stably. In this study, the successive approximation method which is used in the medical radiation such as Positron Emission Tomography (PET) is attempted to apply to environmental radiation measurement.

Keyword: UAV, remote radiation measurement, terrain correction, inverse radiation problem method, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident.

1. はじめに

福島第一原子力発電所の事故以来、有人や無人のヘリコプター等を用いた上空からの放射線モニタリングが行われている^{[1][2]}。無人ヘリコプターやマイクロ UAV は地上測定に比べ、人の立ち入りが困難な場所でも広範囲を素早く測定できるツールとして有用である。原子力機構では、福島第一原子力発電所の事故直後から、無人ヘリコプターやマイクロ UAV を用いた詳細な環境中の放射線量率測定手法の研究開発を行ってきており、線量率の比較的高い場所のモニタリングや河川敷等の線量率の変動が大きい場所の定期的なモニタリングに活用している。上空からの放射線モニタリングにおいて、地上への線量換算は、地表面の線量率が一定であり地形が平面であるモデル (平面モデル) 及び高度と検出器の計数率の指数関数的な相関関係を前提としている。よって、線量率の不均一な場所や山間部での測定データは地上値をトレースすることが難しい。特に、測定高度が 50 m 以下の場合、周辺の樹木や地形に勾配等が影響し、単純な平面モデルによる換算では地上値と一致しない場合がある。

本研究では、医療分野において用いられている最尤推定-期待値最大化 (Maximum Likelihood Expectation Maximization: ML-EM) 法^[3]を応用し、環境の放射線測定用のアルゴリズムを作成、空からの測定値を地上値へ換算する手法を検討した。

本研究は平成 27 年度から実施し、初年度は ML-EM 法を用いた上空からの放射線測定換算のアルゴリズムを構築し、平面モデルを用いた従来法に比べより地上値に近い換算値を得られるのかを検証した^[4]。平成 28 年度では ML-EM 法の換算において重要となる検出効率パラメータの算出及び、シンプルなエリアにおける測定データへの ML-EM 法による換算の適用を実施し、検出効率パラメータの改善により、従来法に比べより地上値に近い放射線分布が得られることが分かった^{[5][6]}。

今年度は平成 28 年度に算出した検出効率パラメータに加え、新たに森林による減衰のパラメータも

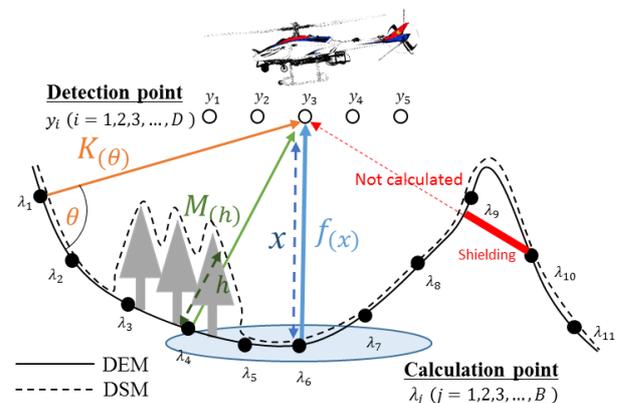


Figure 1. Calculation image of ML-EM method.

[H27-9]

加え、森林を含むエリアにおける ML-EM 法の適用を実施した。

2. 手法

2.1 測定手法

放射線の測定には、無人ヘリコプター (ヤマハ発動機 R-MAX G1) を使用した。放射線測定器には GAGG シンチレーション検出器 (3×3×2cm) を使用し、1 秒毎にγ線スペクトルデータ及び GPS データを取得した。キャリブレーション及び換算データの妥当性検証のため、地上において GPS 付のサーベイメータ (NESI社製, DRD) を使用し地上 1m 空間線量の測定を実施した。同エリアにおいて写真測量を実施し、分解能数十 cm 程度の DSM (Digital surface model) データも取得した。試験は福島県内における平地と森林エリアにおいて行った。

2.2 換算手法

上空で測定した放射線測定データは医療分野において PET 検査等の画像再構成構成法として用いられる ML-EM 法を用いたアルゴリズムにより地上 1m 値へと換算した。ML-EM 法の逐次式は式 (1) のように表される。

$$\lambda_j^{(k+1)} = \frac{\lambda_j^{(k)}}{\sum_{i=1}^N c_{ij}} \sum_{i=1}^N \frac{y_i c_{ij}}{\sum_{j=1}^M c_{ij} \lambda_j^{(k)}} \quad (1)$$

ここで、 k は繰り返し計算回数、 j は計算ポイントの番号 (メッシュ番号)、 λ_j は j における計算推定値、 M はすべての計算ポイント数を表す。また、 i は検出器の位置番号を示し、 y_i は位置 i における放射線計数値、 N はすべての測定ポイント数である。 C_{ij} は検出効率を示す。 C_{ij} には j から i までの距離、 j と i の角度、地形による遮蔽効果、森林による遮蔽効果を考慮したパラメータを用いた。 C_{ij} のパラメータ算出には、無人ヘリコプターによる放射線測定データの他、写真測量データ (DSM: Digital Surface Model) 及び国土地理院の基板地図情報の地表面高度モデル

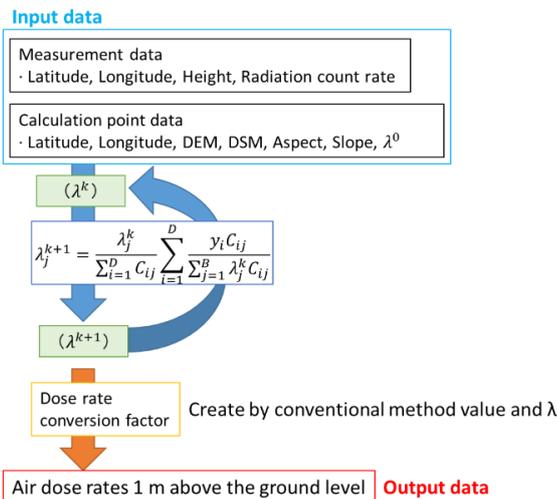


Figure 2. Calculation flowchart.

(DEM: Digital Elevation Model) データを用いた。ML-EM 法による換算イメージ図を Fig. 1 に、計算の流れを Fig. 2 に示す。

検出効率 C_{ij} を式(2)に、距離に応じた減衰係数 $f(x)$ を式 (3), (4) に、角度に応じた減衰係数 $K(\theta)$ を式 (5) に、森林による減衰係数 $M(h)$ を (6) に示す。距離及び角度による減弱係数には Cs-137 の放出する 662 keV 点線源の距離に応じた全エネルギーカウントの光子の減衰を PHITS により計算した結果を使用した^[7]。その結果を Fig. 3 および 4 に示す。森林による減衰係数は複数の森林エリアにおいて上空からの測定と、地上からの測定を実施し、従来法による上空放射線測定値の地上 1m 換算値と地上 1m 測定値の比と、DEM と DSM から算出した樹高との関係から係数を得た。その際、樹高は i の直下半径 20m における j から i の森林 (DSM) 通過距離平均値とした。上空測定地上 1 m 換算値と地上 1m 測定値の比と樹高の関係を Fig. 5 に示す。

$$C_{ij} = f(x) \times K(\theta) \times M(h) \quad (2)$$

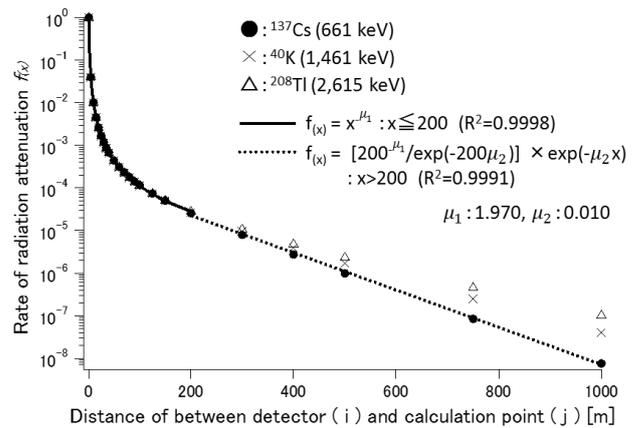


Figure 3. Attenuation factors calculated of distance by PHITS.

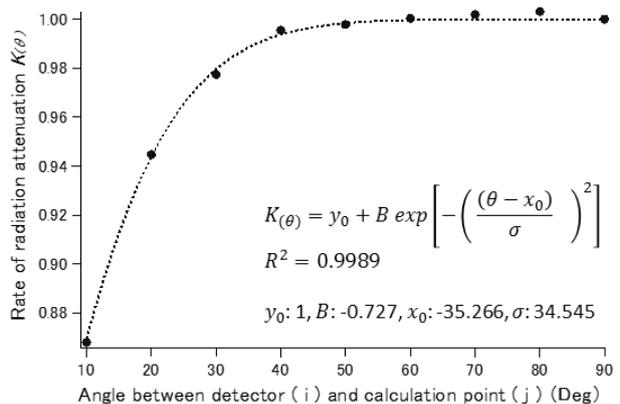


Figure 4. Attenuation factors calculated of angle by PHITS.

[H27-9]

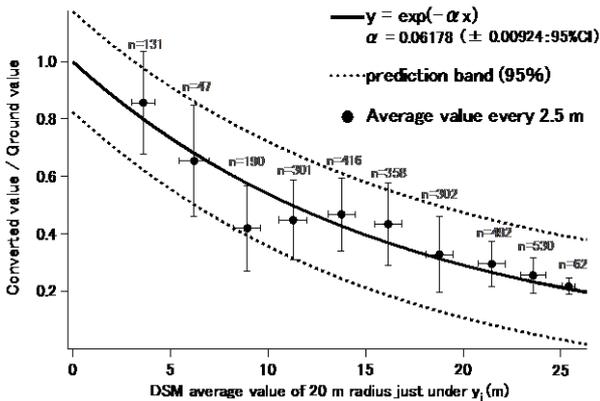


Figure 5. Attenuation factors obtained of forest by actual measurements.

$$f(x) = x^{-\mu_1} \quad (x < 200) \quad (3)$$

$$f(x) = \exp(-\mu_2 x) \times \frac{200^{-\mu_1}}{\exp(-\mu_2 \times 200)} \quad (200 < x) \quad (4)$$

$$K(\theta) = y_0 + A \exp\left[-\left(\frac{\theta - x_0}{width}\right)^2\right] \quad (5)$$

$$M(h) = \exp(-\alpha x) \quad (6)$$

$f(x)$ は距離が 200m までは累乗近似、それ以降は指数近似とし、 $K(\theta)$ はガウス近似とした。なお $f(x)$ はガンマ線のエネルギーにより減衰率は異なるが、高度 80m 以下の測定では $x > 500$ の値を計算する頻度は低い。よって今回は全て Cs-137 (662 keV) のエネルギーでの減衰で計算した。これら計算式について、C 言語を用いてプログラム化し、上空からの放射線測定データの解析を行った。解析範囲は、周辺からの影響を考慮し、測定ポイントから半径 100 m を解析範囲とした。

また、比較対象として、従来より用いられている平面モデルを仮定した解析を実施した。パラメータには、平坦で線量率の一定な場所で、対地高度 10 m でホバリングしたデータと地上の測定値から求めた線量換算係数と、高度を変化させて得た計数率と高度の指数関数的な関係から求めた実効的な減弱係数を用いた。

ML-EM 法により得られた推定値の空間線量への換算は、従来法で得られた換算値と ML-EM 法で得られた推定値から線量換算係数を求め、地上 1m の空間線量値へと換算した。それぞれの得られた値は市販の GIS ソフトウェアを用いてクリギング法を用いて内挿し、コンター図を作成した。

2.3 地上測定値と上空測定換算値の比較評価手法

無人ヘリコプターにより測定したデータについて ML-EM 法を適用し解析された結果と地上の測定値を比較し、効果を検証した。検証には normalized mean square error (NMSE) の値を指標とした。NMSE の算出式を式(7)に示す。

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^C (G_i - K_i)^2}{\sum_{i=1}^C G_i^2} \quad (7)$$

ここで、 C は全データ数、 G は地上値、 K は換算値である。

3. 結果

3.1 オープンフィールド測定への適用

障害物等のない平地において上空からの放射線測定を実施し、ML-EM 法による換算を適用した。Fig. 6 に平地での測定及び換算結果を示す。Fig.6 (a)は地上 1m 測定値、(b)は上空放射線測定値を従来法により地上 1m に換算した結果、(c)は上空放射線測定値を

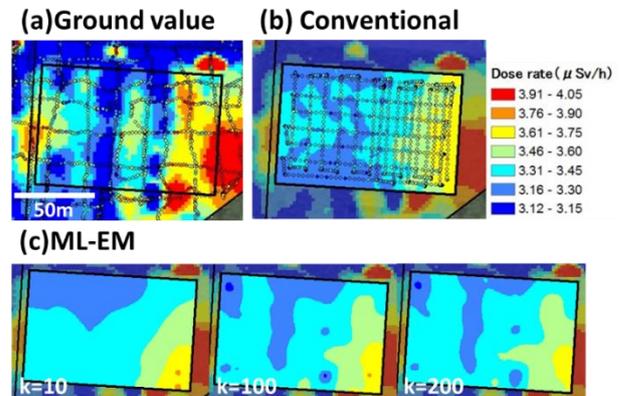


Figure 6. Comparison of radiation values measured by unmanned helicopter and by ground measurement in flat area.

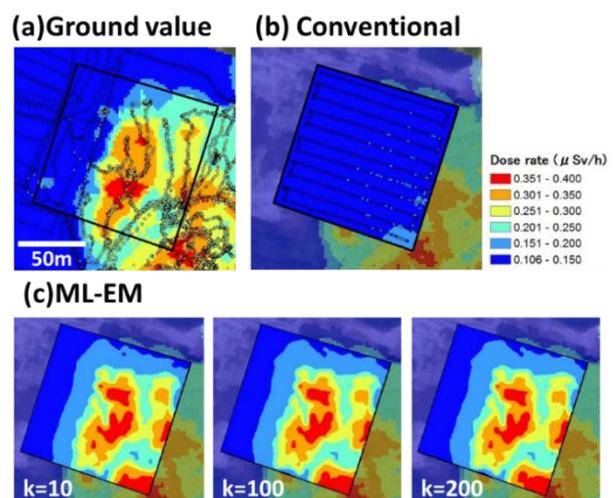


Figure 7. Conversion result of radiation measurement values by unmanned helicopter and ground measurement in forest area

[H27-9]

ML-EM 法を用いて換算した結果である。Fig.6 のエリアでは従来法の NMSE が 0.0035 に対し、ML-EM 法を適用した結果、 $k=100$ の場合、NMSE が 0.0034 となった。

3.2 森林を含むエリアの測定値への適用

森林を含むエリアにおいて上空からの放射線測定を実施し、ML-EM 法による換算を適用した。Fig. 7 に森林を含むエリアでの測定及び換算結果を示す。Fig.7 (a)は地上 1m 測定値、(b)は上空放射線測定値を従来法により地上 1m に換算した結果、(c)は上空放射線測定値を ML-EM 法を用いて換算した結果である。Fig.7 のエリアでは従来法の NMSE が 0.272 に対し、ML-EM 法を適用した結果、 $k=100$ の場合、NMSE が 0.042 となった。

4. まとめ

ML-EM 法を用いて、無人ヘリコプター等を用いた上空からの放射線測定値の地上 1m 空間線量値への換算を試みた。

平成 28 年度の報告では、フィールド測定データを ML-EM 法を用いて換算した際、計算を重ねるごとに放射線の分布が局所化し、計算回数を積み重ねすぎると推定値が地上値から離れ、推定値が発散する問題があり、最適な計算回数は地上値がなければ分からないという問題点があった。

今年度、ML-EM 法で得られた推定値と従来法によって得られる換算値で線量換算係数を作成し、最終的な換算値を算出することで、計算回数を積み重ねても放射線分布が局所化せず、ある程度計算回数を積み重ねることで、一定値のマップを得ることが可能となった。

ML-EM 法を用いることにより、従来の平面モデルでの換算方法に比べ、より地上値に近い放射線分布を得られた。本手法を放射線測定の換算に用いることにより、上空放射線測定でのより詳細な分布の所得及び、遠隔測定によるホットスポットの探査等が可能になることが期待できる。

参考文献

- [1] 原子力規制委員会ホームページ, 放射線モニタリング情報, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/> (2018 年 5 月閲覧).
- [2] Sanada, Y. and Torii T. Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant using an unmanned helicopter. *J. Environ. Radioact.*, 139, 294-299 (2015).
- [3] 篠原ら, 断層映像法の基礎 第 32 回 ML-EM 法と OS-EM 法, 断層映像研究会雑誌, 37, 1-8, (2011).
- [4] 眞田ら, 複数方向の放射線情報から構築する汚染分布の三次元可視化, 平成 27 年度原子力機構施設利用共同研究連携重点研究成果報告書, H27-9 (2016).
- [5] 佐々木ら, 複数方向の放射線情報から構築する汚染分布の三次元可視化, 平成 28 年度原子力機構施設利用共同研究連携重点研究成果報告書, H27-9 (2017).
- [6] Sasaki, M. et al., Development of analysis method for airborne radiation monitoring using the inverse problem solutions, *Prog. Nuc. Sci. Tech.* in press. (2018).
- [7] Sato, T. et al., Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, *J. Nucl. Sci. Technol.* 50:9, 913-923 (2013).