

[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)}, Yukihisa 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: Drone, μ UAV, Remote radiation measurement, Terrain correction, Successive approximation method, Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident.

1. はじめに

福島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て空からの放射線計測が行われている^{[1][2]}。ドローンは安価・小型及び操縦が簡単であることから、狭い地域を手軽に測定できるツールとして有用である。原子力機構では、環境中の放射線量率分布の詳細な測定のために、ドローンを用いた放射線測定手法の研究を行っている。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、ドローンがフライトするのに適している 50 m 以下の高度では、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 ML-EM 法を応用し、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。

2. 手法

2.1 空からの測定データの取得方法

放射線の測定には、市販のドローン(3D Robotix 社製)をベースにした開発機を使用した。放射線測定器

には GAGG シンチレーション検出器 (2×2×2cm) を使用し、3 秒毎に γ 線スペクトルデータ及び GPS データを取得した。また、地上において GPS 付のサーベイメータ (NESI 社製 DRD) を使って詳細な放射線分布情報を得た。同エリアにおいて写真測量を実施し、分解能数 10 cm 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住宅地において行った。

2.2 ML-EM 法を応用したアルゴリズム

医療分野における一般的な画像再構成構成法として、最尤推定-期待値最大化 (ML-EM) 法が挙げられる^[3]。ML-EM 法は統計学的な理論に基づいて繰り返しの式(逐次式)を算出している。その逐次式は式 (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 は繰り返し回数、 j は画像の画素番号 (メッシュ番号)、 M はすべての画素数を表す。また、 i は検出器の位置番号と示し、すべての測定数を N である。 C_{ij} は検出効率を示す。 C_{ij} には地上メッシュ j から検出器 i までの距離及び、地上メッシュ j と検出器 i の角度の補正係数を乗じた。

[H27-9]

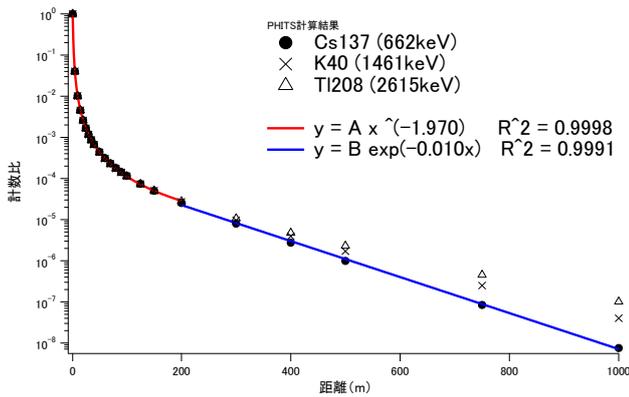


Fig.1 距離に応じた放射線計数減衰

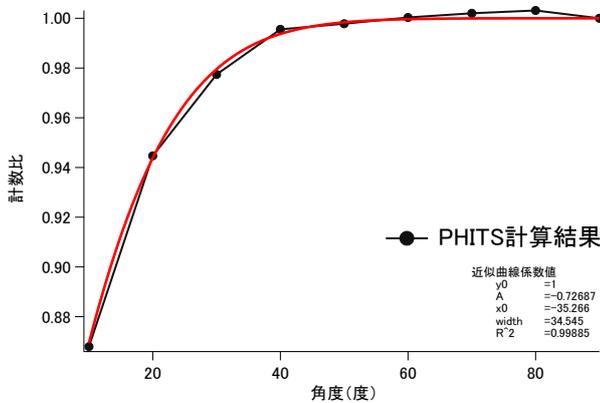


Fig.2 角度に応じた放射線計数減衰

検出効率 C_{ij} を式(2)に、距離に応じた減衰を式(3),(4)に、角度に応じた減衰を式(5)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^[4]。その結果を Fig. 1、2 に示す。

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

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

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

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

$f(x)$ が距離による減衰係数、 $K(\theta)$ が角度による減衰係数を表している。 $f(x)$ については距離が 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 Photon のエネルギーにより減衰率は異なるが、ドローンによる測定範囲は狭く、 $x > 500$ の値を計算する頻度は低い。よって今回は全て Cs137 (662keV) 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、ドローンのデータを解析した。解析範

囲は、周辺からの影響を考慮し、ドローン測定ポイントから半径 100m 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フラット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。

それぞれの測定結果は地上 1m の高さで換算し、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。

3. 結果

ドローンで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(6)に示す。

$$NMSE = \frac{\sum_{i=1}^C (G_i - K_i)^2}{\sum_{i=1}^C G_i^2} \quad (6)$$

C は全データ数、G は地上値、K は換算値である。

Fig.3 は Fig.4 エリアの結果の計算回数増加に伴う NMSE の変動である。ML-EM 法の適用は、計算回数 2~3 回を境に値が局所化し過ぎることによって、地上値からのかい離がみられた。よって計算回数 2 回目の値をマップ化した。

Fig. 4 に平地での測定に適用した結果、Fig.5 に住宅地での測定に適用した結果を示す。それぞれに示されているヒストグラムは相対偏差 (Relative deviation) である。

Fig.4 のエリアでは従来法の NMSE が 0.079 に対し、ML-EM 法を適用した結果 NMSE が 0.034 となった。Fig.5 のエリアでは従来法の NMSE が 0.331 に対し、ML-EM 法を適用した結果 NMSE が 0.219 となった。

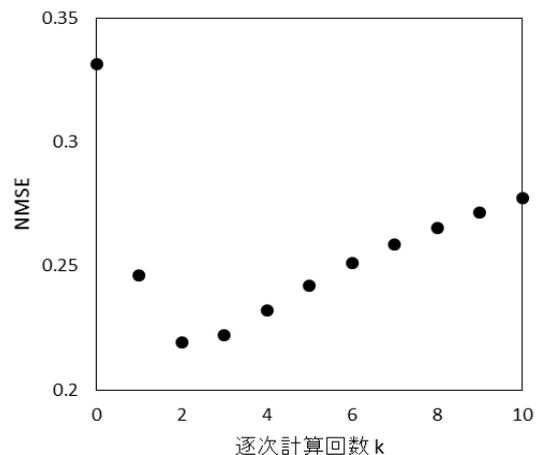


Fig.3 計算回数の増加に伴う NMSE の変動

[H27-9]

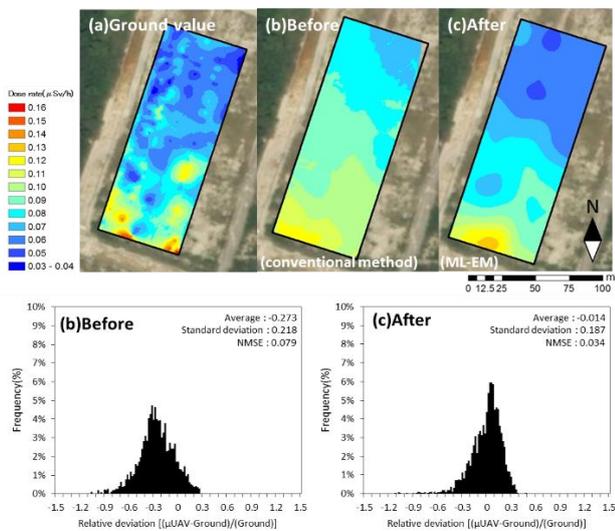


Fig.4 平地測定結果への ML-EM 法の適用結果

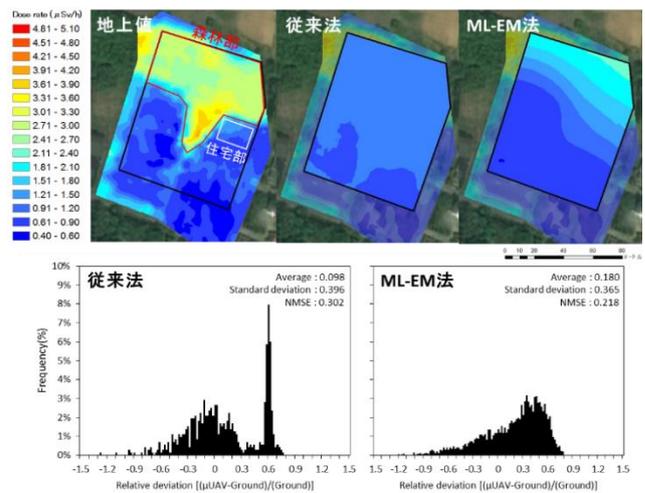


Fig.5 住宅地測定結果への ML-EM 法の適用結果

Fig.4,5 のエリア共に、ML-EM 法を適用した結果、従来法に比べてより地上値に近いマップを得ることができた。しかし、Fig.5 のエリアにおいて、線量の高い森林部の値を上手く再現することができなかった。これは C_{ij} の値に森林部の遮蔽計数を考慮されていないことが原因と思われる。

今後、森林等を含む様々なエリアにおける実測値を収集し、蓄積したデータから C_{ij} を求めることでより地上値に近いマップを得ることができると考えられる。

4. まとめ

空からの測定結果に ML-EM 法を適用した結果、従来法に比べより地上値に近い値のマップを得ることができた。しかし、森林部等が含まれるエリアでは顕著な改善は見られなかった。この原因として、森林部の遮蔽が C_{ij} に考慮されていないことが挙げられる。今後、様々な条件における測定結果を蓄積し、その値から C_{ij} を算出しアルゴリズムの最適化を行う。

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/> (2015 年 8 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] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S.

Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013)