

[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

眞田幸尚^{#A)}, 佐々木美雪^{A)}, 澤幡浩之^{B)}, 松山哲夫^{C)}, 田久創大^{C)}, 石井慶造^{C)}
Yukihisa Sanada^{#A)}, Miyuki Sasaki^{A)}, Hiroyuki Sawahata^{B)}, Tetsuo Matsuyama^{C)},
Sodai Takyu^{C)}, 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. In airborne radiation monitoring using unmanned vehicle, the examination for improvement of accuracy is important. In the field of the medical radiation, a 3D visualization technology of the internal structure of the body is studied by radiation information from plural directions. In this study, the intensity modulation method which is used in the medical radiation is applied to environmental radiation measurement.

Keyword: Accident of the Fukushima Dai-ishi nuclear power station, Unmanned aerial vehicle, Intensity modulation methods

1. はじめに

東京電力(株)福島第1原子力発電所事故(以下、発電所事故)に伴い、大量の放射性物質が周辺に飛散した。周辺の放射線分布の把握のため、政府機関や大学等により様々な空間スケールでの測定が行われている(例えば^[1])。広域な汚染分布状況を把握する手法として、空からの測定手法(以下、エアボーンモニタリング)が使われている。文部科学省と日本原子力研究開発機構(以下、JAEA)は事故直後から有人ヘリを用いたモニタリングを実施し、作成した放射線分布マップは避難区域の設定や除染範囲の設定等様々な用途に使用されている^[2]。本モニタリングは現在においても継続的に実施されており、放射線の変化状況に関する情報を提供している^[3]。

その後、有人ヘリよりも狭い範囲ではあるが、詳細なマップを得るために、無人機(以下、UAS: Unmanned Aerial Sysem)を用いた放射線測定が行われている。UASは、人間が直接測定することに比べて、被ばくを低く抑えることができること、GPSで得られた位置情報により時期を変えて同じ場所を測定できること及び航空法の制限を受けず低い高度(150 m以下)をフライトできることから、線量率の高い場所での測定、除染前後の測定及び河川敷などの環境因子による放射線分布の影響が大きい場所での測定に適している。JAEAで開発の進められているUASsについてTable 1に示す。

事故後すぐに適用されたのは、農薬散布で使用されているYAMAHA社製の無人ヘリコプターであり、専用の放射線検出器を搭載しシステム化が行われた。また、地上値への換算は、実際の福島県の現場で地上での測定値と比較することにより、パラメータを決定し、解析手法の妥当性について検証を行った^[4]。

開発したシステムは、線量率の比較的高い発電所から5 km圏内について測定を行い、初めて同地域の分布状況について詳細なマップを作成した^[5]。また、河川敷における周辺よりも高い放射線量の傾向について明らかにし、時間経過とともに変化している状況について明らかにした^[6]。本ヘリコプターは、国内に1,000台以上運用されていることから、安全性が優れている。

また、安価なドローンについても開発が進められている。ドローンは国内外の様々なメーカにより開発が進められている。国内においても、千葉大などを中心に開発が進められており、部品の性能向上に伴い適用範囲を広げている^[7]。

JAEAと宇宙航空研究開発機構(JAXA)と共同で無人航空機を用いた放射線測定システム(Unmanned Air-plane Radiation Monitoring System: UARMS)の開発を行っている^[8]。UARMSの特徴は、長距離通信での無人飛行が可能(最大約100 km)及び航続距離が長い(最大約6時間)ことが挙げられ、将来的には原子力防災の適用が可能と考えている。

これらの空からの放射線測定結果を地上の放射線量率に換算する手法は、地上の線量率が一定で地形が平坦であるという平面モデルを仮定することが多く、除染やホットスポットがある場所など線量率の勾配が大きい場所及び森林や山間部等では、地上で測定した線量率を正確にトレースできないという課題があった。

医療分野において、PET(Positron Emission Tomography)に代表される放射線情報からの画像再構成技術が研究されている^[9]。これらの技術は、複数方向からの放射線情報から、目的とする線源を特定するいわゆる逆問題の解法を利用している。空から

[H27-9]

Table 1 Features of UASs

	Feature
UARMS 	Size: 4 m (Span) Max. take-off weight: 50 kg Max. flight hour: 6 hour Application area: 100 km radius from ground station.
Unmanned helicopter 	Size: 4 m (Rotor) Max. take-off weight: 100 kg Max. flight hour: 1.5 hour Application area: 3 km radius from ground station.
Drone 	Size: 0.8 m (Span, Length) Max. take-off weight: 8 kg Max. flight hour: 1 km radius from ground station (a range visually confirmable).

の放射線測定手法は、複数方向からの放射線測定情報であり、特定の線源を推定するという事を考えるとこの医療分野での 3D 画像再構成技術が適用できると考えられる。

そこで、本研究では、医療分野での 3D 画像再構成技術を環境中での放射線測定に応用し、測定・解析の精度を向上させる手法の開発を行う。本報告書では、ドローンの測定結果に適用できる基本的なアルゴリズムの作成及び適用例について示す。

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 (1" Φ×1" H) 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。使用したドローンの写真を Table. 1 に示す。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。また、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) データを取得した。取得した DSM データを元に、測定位置における地上との距離を算出できる。

このドローンを用いて、福島県の南相馬市の平面な場所において、データを取得した。フライト条件は、対地高度 10 m、測線間隔を 10 m とした。測定範囲は約 2,000 m² とした。

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^[10]。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。

$$\lambda_j^{(k+1)} = \frac{\lambda_j^{(k)}}{\sum_{i=0}^{N-1} C_{ij}} \sum_{i=0}^{N-1} \frac{y_i C_{ij}}{\sum_{j=0}^{M-1} C_{ij} \lambda_j^{(k)}} \quad (1)$$

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 とである。C_{ij} は検出効率を示す。C_{ij} には地上のメッシュから検出器までの距離 r と r に応じて放射性セシウムのビルドアップ係数を乗じた。減弱係数 μ には Cs-137 の放出する 662 keV の γ 線の数値を採用した。C_{ij} の計算式を式 (2) に示す。

$$C_{ij} = \frac{(B(r) \times \exp(-\mu r)) / (4\pi r^2)}{(B(1) \times \exp(-\mu)) / (4\pi)} \quad (2)$$

この計算式について、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。なお、解析の範囲は、周辺からの影響を考慮し、ドローンで測定した範囲の 10 m 内側をメッシュ状に区切って実施した。

なお、比較対象として、従前より用いられているフラットモデルを仮定した解析 (Simple calculation) 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、市販の GIS ソフトウェアを用いて IDW 法を用いて内挿し、コンター図を作成した。

3. 適用例

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、式(3)に示すようなドローンの測定値と地上の測定値の比を計算しその標準偏差を指標とした。

$$S = \frac{D_g - D_d}{D_g + D_d} \quad (3)$$

ここで、D_g は地上における空間線量率、D_d はドローンによる空間線量率を示す。

Fig. 1 に解析結果を示す。地上測定結果 (Ground measurement) を見ると、本測定場所は南側に線量の高い場所があり、北に行くに従って線量が低くなる傾向にある。まず、Simple calculation の結果を見ると S のヒストグラムは、0 付近となり標準偏差は 0.093 となった。一方、ML-EM 法の適用は 5 回 (k=5) と 20 回 (k=20) 繰り返し計算を行った。適用結果を Fig. 1 に示す。Simple calculation と同様に、式 (3) を当てはめヒストグラムを書くと、5 回の繰り返し計算を行った標準偏差は 0.082 となり、Simple calculation と比較すると若干地上値に近い結果が得られた。一方、20 回繰り返し計算した結果は、標準

[H27-9]

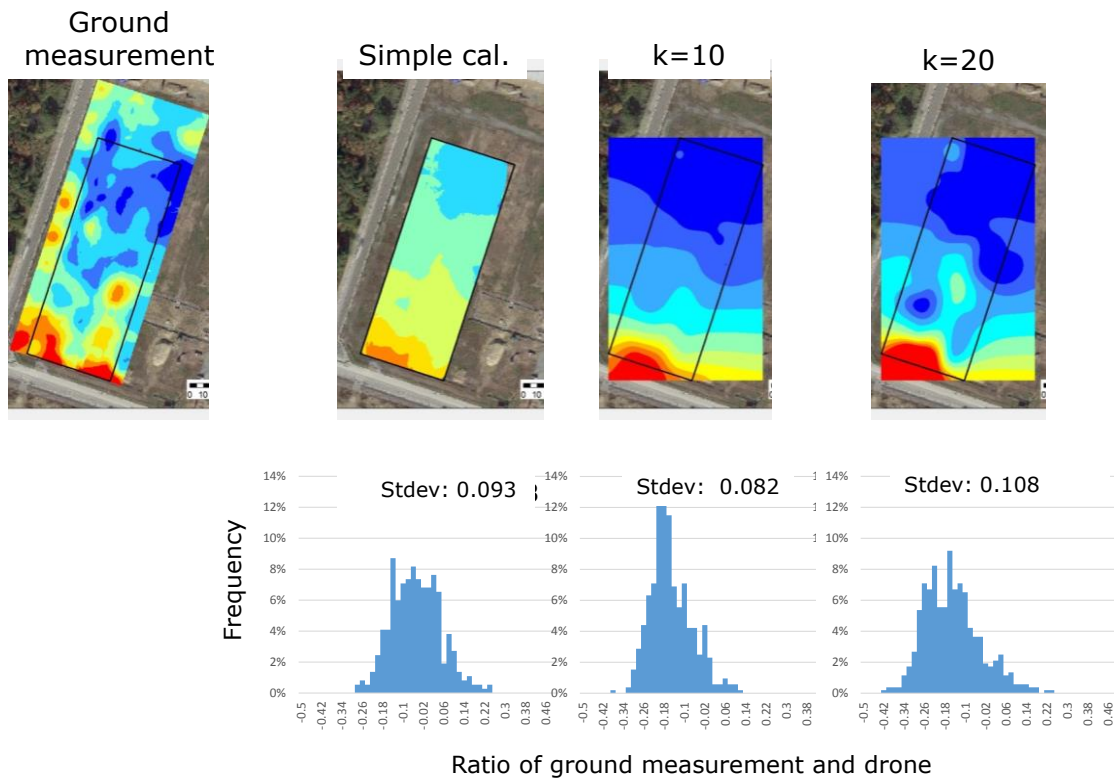


Fig. 1 Application results of drone measurement data with ML-EM methods.

偏差が 0.108 となり、地上値からのかい離がみられた。理論上、計算の回数を増やせば真値に近づくと考えられるが、本結果はその傾向にない。この原因は、測定エリアの周辺から放射線の影響が考えられる。また、アルゴリズム内には天然の放射性核種起源のバックグラウンドが考慮されていない。エネルギーが異なると Cij が変化すると考えられる。今後、スペクトル情報を用いて解析する必要がある。

4. まとめ

今年度は、空からの測定結果に ML-EM 法を適用するためのベースとなるアルゴリズムの作成を行った。作成したアルゴリズムを試験的に単純なジオメトリにおけるドローンの測定結果に適用したものの、従来法から顕著な改善は見られなかった。この原因は、放射線のエネルギー情報が考慮されていないことなどのアルゴリズムの不完全さと、測定エリア外の周辺影響の考慮が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、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., The aerial radiation monitoring in Japan after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident., Prog. Nuc. Sci. Tech., 4, 76-80, (2014)

- [3] 眞田幸尚他, 平成 26 年度福島第一原子力発電所周辺における航空機モニタリング(受託研究), JAEA-Research 2015-006 (2015)
- [4] 眞田幸尚他, 原子力発電所事故後の無人ヘリコプターを用いた放射線測定, JAEA-Research 2013-049, (2014)
- [5] 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)
- [6] Sanada, Y. et al., Radiation monitoring using an unmanned helicopter in the evacuation zone around the Fukushima Daiichi nuclear power plant. Expl. Geophys., 45, 3-7 (2014)
- [7] ミニサーベイヤーコンソーシアムホームページ, <http://mini-surveyor.com/> (2015 年 8 月閲覧)
- [8] 佐藤昌之ら, Multiple Model Approach による構造化ロバスト制御器設計法を適用した放射線モニタリング無人固定翼機の飛行制御則設計-福島県浪江町における放射線モニタリング飛行-, 計測自動制御学会論文集, 51, 215-225 (2015)
- [9] Lomax, A., Intensity modulation methods for proton radiotherapy., Phys Med Biol., 44, 185-205 (1999)
- [10] 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)