事故 7 年後の福島の放射線分布状況および 環境モニタリング技術の最前線

日本原子力研究開発機構 眞田 幸尚

2011 年に発生した福島第一原子力発電所事故から 7 年が経過しようとしている現在でも政府や自治体をはじめとする様々な環境中の放射線モニタリングが実施されている。原子力研究開発機構は、事故直後から有人のヘリコプターを用いた航空機モニタリングをはじめとする放射線モニタリングの実施主体となっている。本稿では、著者が関わっている事業を中心とした環境中での放射線モニタリングの現状についてまとめるとともに、避難指示区域における住民帰還の観点から生まれている新たなニーズと解決する新技術について紹介する。

KEYWORDS: *Accident of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Airborne radiation monitoring, Ground-based measurement, Radiation imaging*

I. はじめに

福島第一原子力発電所事故から 7 年が経過し、現在でも周辺環境では様々なモニタリングが実施されている。主な環境中でのモニタリングは原子力規制庁の受託事業として実施されており、有人のヘリコプターを用いた航空機モニタリング、無人のヘリコプターを用いた発電所周辺のモニタリング、車両を用いたモニタリングおよびサーベイメータを用いた定点測定等である。これらの測定結果は、除染範囲の決定や避難指示区域解除等の政策の意思決定に利用される重要な情報を提供しているが、実際に帰還する住民のニーズとしては、自宅の敷地内における放射性セシウムの存在状況や微小なホットスポットの位置情報などより詳細な情報を求めている。ここでは、現時点における大規模な放射線モニタリングの情報を整理するとともに、事故直後からの線量率の変化傾向の考察および住民のニーズに応えるための放射線計測技術の新技術について紹介する。

II. 環境モニタリングの状況

1. 大規模モニタリングの実施状況

現在、政府の行う大規模なモニタリングは、原子力規制委員会が行う、車両や無人ヘリなど様々なツールを駆使したモニタリング事業である「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集

約」¹⁾および有人のヘリコプターを用いたモニタリングである「80km 圏内外における航空機モニタリング事業」²⁾が挙げられる。これらの事業による測定結果は事故直後から蓄積されており、それらの測定結果を比較することによって変化傾向に関する情報を得ることができる。

測定手法毎に対象物が異なるので、相互に比較することにより様々な考察が可能となる。例えば、車両サーベイは道路上の測定結果であることから他のモニタリング結果と比較すると空間線量率は低くなり、この差から道路上の降雨等による洗い流し(ウォッシュアウト)の効果を定量的に評価できる。一方、航空機モニタリングの測定結果は、森林も含めて測定できない場所はないが上空からの測定範囲が広いことから、地上における局所的な空間線量率の分布を再現することは難しい³⁾。

その他にも、福島県をはじめとした自治体や関係省庁により、目的に分けて様々なモニタリングが行われている。これらのモニタリングは年度ごとに改定される総合モニタリング計画³⁾に沿って実施されている。

2. 事故後 7 年における空間線量率の分布状況

図 1(a)および(c)に福島第一原子力発電所から 80km 圏内におけるサーベイメータを用いた定点測定結果および車両モニタリングによる測定結果を示す。このように、両者とも同様な空間線量率の分布傾向を示しており、測定時期に応じて空間線量率の減少が確認できる。また、図 1(b)に有人ヘリによる航空機モニタリング結果および図 1(d)に無人ヘリコプターによる福島第一原子力発電所から約 5km 圏内におけるモニタリング結果について示す。これらの空からのモニタリング結果は測定できない範囲がないため全体像を把握しやすい。無人

Radiation distribution situation seven years after the Fukushima dai-ichi nuclear power plant accident and the leading edge of technology for environmental radiation monitoring: Yukihisa Sanada.

(2018 年 10 月 22 日 受理)

図1 代表的な広域な空間線量率測定結果

ヘリコプターは有人ヘリコプターよりもさらに低高度をフライトできるため、詳細な放射線分布が得られ、事故後のブルームの跡が視覚的に確認できる。また、福島第一原子力発電所の敷地に近い場所においても、空間線量率は減少傾向にあることがわかる。

3. 変化傾向の評価

図1に示したような、空間線量率の減少傾向を定量的に評価することは、将来の予測や住民の被ばく評価のために有用である。事故後からの放射性核種の変化傾向の評価は、複数の指数関数での近似が用いられることが一般的である。空間線量率の近似式の傾きは実効半減期として表され、そこから放射性セシウムの物理的半減期を差し引いたものを環境中でのウエザリングを示す環境半減期として定義される。図2には、福島第一原子力発電所から80km圏内における車両モニタリングと航空機モニタリングで求めた空間線量率を最初に行ったモニタリング結果を1に規格化し時系列でプロットした。図中には2重指数関数($y = a \exp(-bx) + c \exp(-dx)$): a, b, c, d は定数)で近似した曲線を示している。この2重指数関数の傾きはそれぞれ初期の早い成分と2年後以降の遅い成分

図2 航空機モニタリングおよび車両モニタリングによる発電所から80km圏内における空間線量率の変化傾向。最初のモニタリングを1として相対値の平均値をプロット。誤差棒は標準偏差。(2017年時点で0.2μSv/h以上の地域に限定)

分を示している。結果をみると、環境半減期の早い成分は航空機モニタリングで0.72年、車両モニタリングで0.33年と違いが確認でき、これは、車両の測定対象である道路上における放射性セシウムの洗い流しの効果に起因する。この効果は、環境半減期の遅い成分をみると現在でも続いていることが分かる。一方、航空機モニタリングの結果が示すように全体的には物理的半減期のみの減少傾向に近づいていることが分かる。これらの半減期の評価結果は、対象とするエリアや期間によって若干の差が出るものの、概ね近い数値が報告されている^{4, 5)}。今後も継続的なモニタリングを実施し、変化傾向を把握することが望ましい。

Ⅲ. 放射線計測技術へのニーズと新技術

1. 逆問題解析の応用と3次元イメージング

前述のように現在の放射線測定へのニーズはより精密な測定に変化してきており、ハード面やソフト面で様々な開発・改善が行われている。Sato et al. (2017)⁶⁾は小型のコンプトンカメラを開発し、福島第一原子力発電所内における放射線イメージングに成功している。このようなハード面の改善だけでなく多方向で取得された測定データから3次元的な分布を求める手法についても研究が進んでいる。有人ヘリや無人機を用いた空からのモニタリング情報は、動きながら計測することから1地点における測定情報の不確かさは大きいが多方向からの放射線計測情報を得ることができる。このような複数方向からの放射線情報を元に強度分布(画像)を構築する方法は、PETなどに代表される医療放射線計測技術に通ずる。Sasaki et al. (2018)⁷⁾は、医療放射線計測技術の画像再構成技術として使われている逆問題解析手法の一種である ML-EM (Maximum Likelihood - Expectation Maximization) 法を空からの測定データの解析に適用した例を報告している。図3に本手法で使用されているパラメータの関係を示す。まず、測定位置と計算位置間の距離や遮蔽係数などのパラメータを実測や計算シミュレーションで求める。これらのパラメータを各々の測定位置と計算位置について計算し、それらが最適になるように逆問題的な計算を繰り返す。本手法を約1km²の場

図3 ML-EM法で使用するパラメータ

図4 ML-EM法の適用例と地上測定値との比較
(a),(b)空間線量率マップ：単位は $\mu\text{Sv/h}$
(c),(d)地上値との比較

所で計測した無人ヘリによるモニタリングに適用した結果について図4に示す。図4(a)および(b)には、ML-EM法の解析結果をコンター図で示している。また、図4(c)および(d)には、地上で歩行による測定を行った結果との比較を示す。比較には無人ヘリの測定結果と地上での測定結果の差を地上の測定値で除した数値を相対偏差とし、0.1区間ごとのヒストグラムとして示している。このように、従来の手法に対して、相対偏差が0に近づいており、精度の向上が認められる。

この手法は、空からだけでなくすべての環境中での放射線計測手法に適用可能であること、技術革新の著しい写真測量やレーザ測量による3次元測量手法と相性がいいことから様々な応用が期待できる。

2. 水底モニタリング技術の高度化

福島県内には3,700か所の農業用のため池があり、池底に蓄積した放射性セシウムの濃度分布の把握は、営農再開時の課題であった。これまで、土壌サンプルの採取しか濃度の測定手法はなかったが、ファイバー型の検出器を用いることによって水平方向の面的な分布評価を可能とする技術が開発されてきた⁸⁾。一方、深さ方向の分布情報は、除染時の目安となるだけでなく、インベントリーの評価も可能となることから、簡便な評価方法が必要とされてきた。

Ochi et al. (2018)⁹⁾は水底をダイレクトに計測した γ 線のスペクトル情報に着目し、水平方向の情報を評価する手法の開発に成功している。本手法は、水底表面で測定した γ 線スペクトルの低エネルギー側の計数率と直接 γ 線の比が、放射性セシウムの存在深さにより変化することを利用している(図5)。本論文では、50か所以上の

福島県内のため池において、実際に γ 線スペクトルと水底の堆積物コアのデータセットを比較し、両者の相関関係を見出している(図6)。このような技術は今後の避難指示区域の解除に向けても重要な情報を提供すると考えられる。

図5 底質表面での γ 線スペクトルの測定イメージ
a)放射性セシウムの分布深さが浅い場合
b)放射性セシウムの分布深さが深い場合
c)底質中の異なる放射性セシウムの分布深さにおける γ 線スペクトルの変化イメージ

図6 水底の堆積物サンプルの深度方向実測結果と堆積物表層での γ 線スペクトル測定の散乱 γ 線と直接 γ 線の比との関係

IV. まとめ

政府が行う大規模モニタリングに関わる筆者の視点で、事故から7年が経過した現在の空間線量率の分布状況の変化および多様化する放射線計測に関するニーズに対する新技術について紹介した。政府では、現在も残る避難指示区域について特定復興再生拠点を整備し、将来的に解除する方向で議論が進められている。今後も住民の安全安心のため、確実なモニタリングを実施していくとともに、将来の原子力防災の対応のためにも新たな放射線計測技術の研究・開発が望まれる。

－ 参考文献 －

- 1) 原子力規制委員会, 平成 28 年度放射性物質測定調査委託事業「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の分布データの集約」成果報告書, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/14000/13159/view.html> (2018 年 10 月閲覧).
- 2) 眞田幸尚他, 平成 28 年度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-Technol. 2017-034, pp. 117. 2017.
- 3) モニタリング調整会議, 総合モニタリング計画, <http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/204/list-1.html> (2018 年 10 月閲覧).
- 4) Kinase S. et al., Long-term predictions of ambient dose equivalent rates after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident., J. Nucl. Sci. Technol. 54, 1345-1354. 2017.
- 5) Sanada, Y. et al., Evaluation of ecological half-life of dose rate based on airborne radiation monitoring following the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident., J. Environ. Radioact., 192, 417-425. 2018.
- 6) Sato, Y. et al., Radiation imaging using a compact Compton camera inside the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station building., J. Nucl. Sci. Technol., 55, 965-970. 2018.
- 7) Sasaki, M. et al., Development of analysis method for airborne radiation monitoring using the inverse problem solutions. Prog. Nucl. Sci. Tech. 2018, 6, 63-67. 2019.
- 8) 眞田幸尚, 福島第一原子力発電所事故後におけるプラスチックシンチレーションファイバーを用いた環境計測, 光学, 45, 300-305, 2016.
- 9) Ochi, K., et al., Development of an Analytical Method for Estimating Three-Dimensional Distribution of Sediment-Associated Radiocesium at a Reservoir Bottom. Anal. Chem., 90, 10795-10802. 2018.

著者紹介

眞田幸尚 (さなだ・ゆきひさ)

日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター
(専門分野/関心分野)放射線計測・環境放射能・原子力防災