

# 80km 圏内の空間線量率及び土壌沈着量の 経時変化



## **]**. はじめに

特集

福島第一原子力発電所事故(以下,福島事故)に おいては,大量の放射性物質が環境中に放出され東 日本の広い地域に沈着し放射線レベルの顕著な上昇 をもたらした。事故から9年が経過し,放射線レベ ルは大きく減少してきた。本稿では,事故後に継続 して実施された大規模環境調査の結果に基づき,福 島第一原子力発電所から半径80km内(以下, 80km 圏内)の空間線量率と土壌沈着量の経時変化 の特徴についてまとめて紹介する。

#### 2. 福島事故後の大規模環境モニタリング

福島事故の影響を系統的に明らかにするために は、信頼のおける統一した手法を用い、大規模な環 境モニタリングを継続して実施することが必要で あった。重大事故後の中長期モニタリングに対する 準備は十分ではなかったが、多くの関係者の努力に より福島事故後の比較的短期間のうちに地上並びに 航空機による大規模モニタリング体制が整備され活 動が開始できたのは幸運であった。筆者は、通称分 布状況調査と呼ばれる地上における大規模環境モニ タリングプロジェクトに従事した<sup>11</sup>。このプロジェ クトでは 2011 年 6 月に第 1 次調査が開始され、現 在も調査が継続されている。当プロジェクトで得ら れた結果を以下に紹介する。

分布状況調査では4種類の異なる手法を用いて空 間線量率(周辺線量当量率: µSv/h)の測定を実施 した。80 km 圏内の標準的な平坦地約 6,500 地点を 対象とした定点測定<sup>2)</sup>.東日本広域数万 km を対象 とした自動車サーベイ<sup>3)</sup>, 80 km 圏内の約600の 1km 平方区画における生活環境を対象とした歩行 サーベイ4)を行った。人の立入りが難しい原発周辺 の5km 圏内については無人ヘリコプターサーベイ による測定を実施した5。また、別プロジェクトの 中で広域を対象とした航空機モニタリングが実施さ れた。。これらの測定手法はそれぞれ特有の技術的 な特徴を有するのに加え、対象としている環境の特 徴も少しずつ異なることに注意を払うことが必要で ある。例えば、歩行サーベイでは人間の生活環境に 関連のある空間線量率を測定するのに対し、航空機 モニタリングでは森林も含めた広い地域の平均的な 空間線量率を測定することになる。

土壌に沈着した放射性核種に関しては、単位面積 に存在する核種の総量に相当する沈着量(Bq/m<sup>2</sup>) に加え、土壌中の深さ方向の放射性 Cs 濃度分布(深 度分布:Bq/kg)の測定を行った。沈着量については、 第1次調査では約2,200地点において各地点5個の 土壌試料を採取し、持ち帰っての分析を行った"。 7線放出核種が重要であることが明らかになった第 2次調査以降は、可搬型の Ge 検出器を環境に持ち 出して行う in situ 測定を主な手法として用いた<sup>2)</sup>。 in situ 測定では広い範囲からやってくる 7線を基に



図1 80 km 圏内の空間線量率マップ

定量を行うため、測定地点の平均的な沈着量を評価 することができる。深度分布は深さ毎に厳密な土壌 採取が可能なスクレーパープレートを用いた採取と 分析を行った<sup>®</sup>。

## 3. 空間線量率の経時変化

2011年から 2016年までの 80 km 圏内における空 間線量率分布を図1に示す。。全体の空間線量率が 時間と共に減少する様子が明らかにみてとれる。 図2では、80km 圏内の平均空間線量率を測定手法 毎に計算し経過時間にともなう減少曲線として表し ている。定点測定の結果も自動車サーベイの結果 も物理半減期による減衰(物理減衰)に比べて顕著 に速く減衰してきた。歩行サーベイは 2013 年に開 始したため、2011年からの減少傾向を示すことは できないが、他の測定結果との関係から定点測定と 自動車サーベイの間に位置すると推定される。以上 から、歩行サーベイデータに代表される、人間の生 活に関係した様々な環境の放射性 Cs による空間線 量率は、2016年の段階で物理減衰から予想される 空間線量率に比べて平均的に 1/2 から 1/3 程度低い ところまで減少していることが分かった。

定点における空間線量率が物理減衰に比べて速く 減少する主な原因を2つ挙げることができる。1つ は,放射性Csの地中への浸透である。放射性Cs の90%が存在する深度は,2011年には約2cmであっ たが 2016 年には 4.2 cm まで増加した<sup>10</sup>。この浸透 により, 放射性 Cs から放出される γ 線に対する遮 蔽効果が増加し, その結果浸透がない場合に比べて 30%程度空間線量率が減少したと見積もられた<sup>9</sup>。

もう1つの原因として大規模に行われた除染が挙 げられる。定点測定を行った約6,500地点の一部で は継続的な調査の途中で除染が実施された。除染が 行われなかった地点の空間線量率と全地点の空間線 量率を比較すると,後者のほうが2016年において 20%程度速く減少した<sup>20</sup>。すなわち,定点測定が行 われた全地点の平均空間線量率の減少を除染が20% 程度加速したことになる。除染効果については被ば く線量低減効果の観点も含め更なる解析が望まれる。

定点測定に比べて自動車サーベイの空間線量率が 更に速く減少している主な原因として,放射性 Cs の水平方向への移行の影響が考えられる。舗装道路 や家屋等の人工建造物に沈着した放射性 Cs は,沈 着後早い時期に除去されることが知られている<sup>110</sup>。 自動車サーベイが行われる道路はほぼ全部が舗装さ れており,また道路の周辺には家やその他の人工建 造物が存在する割合が高いため,道路上で測定した 空間線量率は放射性 Cs の除去効果により速く減少 すると考えられる。定点測定結果と自動車サーベイ 結果の比較により,この放射性 Cs の除去・移行の 効果は最大で 30%程度あると推定された<sup>9</sup>。

上記の空間線量率の減少傾向はあくまでも 80 km 圏内全体の平均的な傾向を示したものであり, 個々



図 2 80 km 圏内の平均空間線量率の経時変化

の地点での空間線量率減少傾向は状況により様々に 変化する。空間線量率の減少に影響を与える要因と して,土地利用状況と人間の活動がある。土地利用 状況に関しては,森林で空間線量率の減少が遅く, 都市環境で速く,農地はその中間にあたる<sup>3)</sup>。実際, 純粋な森林においては,放射性 Cs は森林環境中で 移動しているだけであり,空間線量率も物理減衰に 近い速度で減少することが観察されている<sup>12)</sup>。また, 人間活動が盛んな地域では活動のない地域に比べ空 間線量率の減少が速いことを示唆する状況証拠が複 数観察されている。人間活動の影響を定量的に解析 するのは今後の重要な課題の1つである。

#### 4. 土壌沈着量の経時変化

2011年6月に行われた分布状況調査の第1次調査 では<sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>131</sup>I, <sup>129</sup><sup>m</sup>Te, <sup>110m</sup>Ag, <sup>89</sup>Sr, <sup>90</sup>Sr, <sup>238</sup>Pu, <sup>239+240</sup>Puが広域にわたり検出された<sup>70</sup>。この時に検出 された核種毎の最大沈着量を基に 2011年6月から 50年間の被ばく線量の概算を行い, 放射性 Cs が圧 倒的に重要であることを確認した。

80 km 圏内の撹乱のない平坦地における平均沈着 量の経時変化を図3に示す<sup>90</sup>。<sup>134</sup>Cs と<sup>137</sup>Cs の沈着 量は共にほぼ物理減衰にしたがって減少してきてい る。すなわち状況が変化しにくい平坦値では,水平 方向の放射性Cs の動きは少ないことが示唆される。 前章で述べたように森林における放射性Cs の水平



方向への動きは少なく,80km 圏内全域において全 般に放射性 Cs の動きは小さいことが明らかになっ ている。一方、人間が関係した一部の地域において は大きな放射性 Cs の動きが見られ、対照的な様相 を示している。

地表面に沈着した放射性 Cs は時間と共に地中方 向へ浸透してきた。福島では2種類の典型的な深度 分布が観察された<sup>8)</sup>。1つは指数関数にしたがって 地中方向に放射性 Cs 濃度が減少する分布,もう1つ はある深度に濃度のピークを持ちそれ以深は指数関 数に漸近的に近づく分布である。いずれの深度分布 についても時間と共に放射性 Cs が地中へ浸透する 傾向が見られた。放射性 Cs の90%が含まれる 90% 深度,及び線量評価のパラメータとなる緩衝重量深 度はほぼ時間に比例して増加してきた。90%深度の 経時変化を図4に示す<sup>10</sup>。放射性 Cs の浸透が空間 線量率の減少傾向の一因となったのは既に述べたと おりである。

### 5. 大規模データの応用解析

福島事故では技術の発展により,チェルノブイリ 事故等と比べ格段に多種かつ多量の環境モニタリン グデータが蓄積された。これによりいわゆるビック データを利用した統計解析による情報の抽出が可能 となった。物理半減期による減衰を除いた空間線量 率の減少傾向を解析することで空間線量率の予測モ



図3 80 km 圏内の放射性 Cs 平均沈着量の経時変化

デルが開発された<sup>13)</sup>。この予測モデルは経験的な 2成分式を用いて空間線量率の減少傾向を近似して いるが、大量の走行サーベイ実測データの統計解析 に基づき条件別にパラメータを決定しており、信頼 区間を同時に示す形での予測が可能である。

異なる手法を用いて作成した空間線量率マップを 統合する試みも行われている。図1では、定点測定 と航空機モニタリングの結果のシンプルな手法によ る統合マップを示した。更に、歩行サーベイ、自動 車サーベイ及び航空機モニタリングで得たデータ を、階層ベイズ統計を用いて統合するより洗練され た手法が開発された<sup>14)</sup>。この手法ではそれぞれの測 定手法が本来持つ特徴を活かしつつ、精度と位置分 解能が高い 50 m メッシュの空間線量率マップが作 成される。

#### 6. 今後の課題

チェルノブイリ事故の例を見ても分かるように, 事故後の環境汚染は数10年のオーダーで続くこと が予想されるため,規模や頻度の最適化は必要であ るが,継続的な長期モニタリングを行い環境への影 響を適切に評価していくことが不可欠である。

福島周辺の空間線量率全体の平均な変化傾向とその原因,要因については全容が明らかになりつつある。一方,地域毎の状況により変化傾向は大きく変動することが分かっており,対象地域を絞ったうえで空間線量率変化を放射性 Cs の動きで説明すること

が大きな今後の課題である。特に本文でも記載した ように、人間活動の影響や除染の効果を包括的に解 析することは重要な課題として残されている。

より広い視野から見た場合,今回の事故で得られ た貴重な教訓を様々な観点でまとめて将来に役立て ることが重要である。本稿の紹介内容以外にも福島 の貴重な場を対象とした環境情報が多量に蓄積され てきており,これらを適切に処理,文書化して今後 に残すことが我々の義務である。

#### 謝辞

本稿は, 文部科学省及び原子力規制庁から委託を 受けて実施した分布状況調査事業の中で得られた成 果の一部をまとめたものです。事業に参加・関係し た多くの方々の努力により得られた成果となりま す。皆様のご協力に心より感謝いたします。

#### 参考文献

- Saito, K. and Onda, Y., J Environ Radioact, 139, 240-249 (2015)
- Mikami, S., et al., J Environ Radioact, 210, 105941 (2019)
- Andoh, M., et al., J Environ Radioact, 210, 105813 (2019)
- 4) Andoh, M., J Environ Radioact, 210, 105812 (2019)
- Sanada, Y. and Torii, T., J Environ Radioact, 139, 294-299 (2015)
- 6) Sanada, Y., et al., J Prog In Nucl Sci Technol, 4, 76-80 (2014)
- 7) Saito, K., et al., J Environ Radioact, 139, 308-319 (2015)
- Matsuda, N., et al., J Environ Radioact, 139, 427-434 (2015)
- 9) Saito, K., et al., J Environ Radioact, 210, 105878 (2019)
- 原子力規制庁,平成28年度分布状況調査報告書 (2017)
- Yohimura. K., et al., J Environ Radioact, 178-179, 48-54 (2017)
- 12) Kato, H., et al., J Environ Radioact, 210, 106058 (2019)
- 13) Kinase, S., et al., J Nucl Sci Technol, 54, 1345-1354 (2017)
- 14) Wainwright, H., et al., J Environ Radioact, 167, 62-69 (2017)

((国研)日本原子力研究開発機構 原子力緊急時支援・研修センター)