30年後の福島環境放射線レベル推定とその技術開発

日本原子力研究開発機構 木名瀬 栄

日本原子力研究開発機構(原子力機構)では、福島第一原子力発電所(福島第一原発)から80km圏内を対象に、空間線量率の分布状況変化モデルを開発している。膨大な空間線量率測定データを用いて避難指示区域内外の地域特性に応じたモデルパラメータを導出し、福島第一原発事故30年後までの空間線量率分布の経時変化を推定するとともにモデルの不確かさ解析および妥当性検証を行った。本稿では、空間線量率の分布状況変化モデルとそのモデルパラメータの特徴、モデルを用いて作図した空間線量率分布の将来予測図を紹介する。

KEYWORDS: *Ambient Dose Equivalent Rate, Prediction Model, Ecological half life, Caesium, Vehicle Borne Survey, land Use, Map, Fukushima*

I. はじめに

福島第一原発事故後、住民の放射線レベルの理解、適切な除染などの防護措置の選択、避難指示区域の見直しなどに資する基礎情報を提供するため、福島第一原発事故により環境中に沈着した放射性セシウムやそれに伴う空間線量率の変化傾向を予測できる長期的影響把握手法の確立が必要である。しかし、公衆の防護の目的に特定されるべき環境中に沈着した放射性セシウムは、線源として適切な防護措置の選択に結びつけることが困難な状況にある。福島第一原発事故前の経験から、地表面に沈着した放射性セシウムの経時変化は、その放射性壊変に加えて、風雨などの自然環境変化に影響(ウェザリング効果)されることが確認されているが、評価対象とする時空間によって異なるため、その程度を信頼性高く推定することが困難である。

原子力機構では、平成24年度は文部科学省の、平成25年度からは原子力規制庁の委託業務の一環として、空間線量率の分布状況変化モデルを開発している(1-3)。空間線量率の分布状況変化モデルは、福島第一原発から80km圏内の空間線量率測定データと土地利用形態に関するデータを用い、ある初期状況から時間とともに解が変化し、未来予測のように将来の解が得られる初期値間

題型としている。すなわち、土地利用形態に応じた空間線量率の変化を大量に調べることを基本とした、一般化された経験則によって現象を捉える統計帰納法によるモデルとしている。本報告では、これまでに開発した空間線量率の分布状況変化モデルの特徴を示すと同時に、これからの福島復興に資するよう、空間線量率の分布状況変化モデルを用いて作図した、福島第一原発から80km圏内の空間線量率分布の将来予測図を紹介する。

II. 空間線量率の分布状況変化モデル

空間線量率の分布状況変化モデルは、福島第一原発から80km圏内の広域な範囲に沈着した放射性セシウムを起因とした空間線量率の状況の予測に役立てるよう、福島第一原発事故後に実施された走行サーベイなどによる空間線量率の膨大な測定データをもとに構築している。福島第一原発から80km圏内を対象に、土地利用形態別に環境半減期(放射性セシウムの壊変による影響を取り除き、放射性セシウムの環境中での挙動に影響を及ぼすウェザリングや人間活動などの様々な要因により、環境中の空間線量率が半分の値になるまでの時間)を導出し、この環境半減期をモデルパラメータとした2-コンパートメントからなるモデルとした。

1. モデル式

空間線量率の起因となる放射性セシウム(^{134}Cs , ^{137}Cs)を対象とする、2-コンパートメントモデルである空間線量率の分布状況変化モデルは次式(1)で表す。

Prediction of Ambient Dose Equivalent Rates for 30 Years after the Fukushima Accident and its Technological Development : Sakae Kinase

(2016年4月11日受理)

$$D(t) = (D_0 - D_{BG}) \left\{ f_{fast} \exp\left(\frac{-\ln 2}{T_{fast}} \cdot t\right) + (1 - f_{fast}) \exp\left(\frac{-\ln 2}{T_{slow}} \cdot t\right) \right\} \\ + \frac{k \exp(-\lambda_{134}t) + \exp(-\lambda_{137}t)}{k + 1} + D_{BG} \quad (1)$$

ここで、 $D(t)$ は経過時間 t における空間線量率、 D_{BG} は平均的なバックグラウンド空間線量率 $0.05 \mu\text{Sv/h}$ 、 T_{slow} は減衰が遅い成分の環境半減期 92 年、 k は ^{134}Cs の ^{137}Cs に対する初期空間線量率比(同じ濃度)2.7、 λ_{134} は ^{134}Cs の壊変定数、 λ_{137} は ^{137}Cs の壊変定数である。式(1)中の初期空間線量率 D_0 は、走行サーベイなどによる測定データを生活圏の空間線量率へ補正した値を、減衰が速い成分の環境半減期 T_{fast} および減衰が速い成分の割合 f_{fast} は、土地利用形態別の値(累積頻度分布作成)を走行サーベイの空間線量率測定データから導出・設定している。

式(1)は、統計帰納法によるモデルを表現している。モデルパラメータである T_{fast} および T_{slow} は放射性セシウムの沈着時の状態や沈着表面の種類などに依存し、環境中の放射性セシウムの移行メカニズムと定量的に関係づけることは困難であるが、 T_{fast} は放射性セシウムの土壌深さ方向への移行にともなう土壌による遮蔽、ウェザリングや除染などの人間活動による放射性セシウムの低減化に、 T_{slow} は浸潤などにおける部分的な沈着表面の放射性セシウムの保持や、再浮遊や人間活動による放射性セシウムの再分布に影響されていると考える。 T_{fast} および T_{slow} は、それぞれ相性における分布相と消失相を表現する値に相当するといえよう。

2. 線量率測定データとモデルパラメータ

(1)空間線量率測定データの調査

福島第一原発事故後に得られた空間線量率は、モニタリングポストなどの定点における連続測定データ(時間連続データ)、走行サーベイなどに用いられた可搬型測定器による不定期な測定データ(時間離散データ)に大別される。それぞれの空間線量率測定データには、空間線量率の分布状況変化モデルへの適用において、時空間的な特徴を反映すべき点に長短がある。すなわち、時間連続データは同一地点において空間線量率の経時変化を解析することのできる十分な時間頻度の情報を提供するが、測定地点が限定されており地域的に十分な広さとその代表性をカバーできない。一方、時間離散データは空間線量率の地域的な特徴を解析するのに十分な範囲をカバーしているが、事故初期などの数回の測定データでは経時変化の傾向を決定するのに十分ではない。そうしたことから、平成 24 年度の空間線量率の分布状況変化モデル開発では、時間連続データである「東京電力株式会社福島第一原子力発電所 20km 圏内の測定結果」と「福島県による緊急時環境放射線等モニタリング実施結果」、時間離散データである走行サーベイ、航空機モニタリングなどによって得られた測定結果を用いてモデルパラメータ

表 1 走行サーベイデータ

測定実施日	データ数
1 次：平成 23 年 6 月 4 日～13 日	42,090
2 次：平成 23 年 12 月 5 日～28 日	33,887
3 次：平成 24 年 3 月 13 日～30 日	59,037
4 次：平成 24 年 8 月 20 日～10 月 12 日	126,249
5 次：平成 24 年 11 月 5 日～12 月 12 日	87,991
6 次：平成 25 年 6 月 12 日～8 月 8 日	128,270
7 次：平成 25 年 11 月 5 日～12 月 12 日	115,985
8 次：平成 26 年 6 月 23 日～8 月 8 日	104,630
「総合モニタリング計画」に基づき実施	
1 巡：平成 23 年 8 月 2 日～30 日	97,512
2 巡：平成 23 年 8 月 31 日～10 月 9 日	114,971
3 巡：平成 23 年 10 月 1 日～11 月 4 日	119,660
4 巡：平成 23 年 11 月 5 日～12 月 12 日	134,376
5 巡：平成 23 年 12 月 14 日 ～平成 24 年 1 月 30 日	135,724
6 巡：平成 24 年 2 月 4 日～3 月 10 日	132,692
7 巡：平成 24 年 3 月 12 日～4 月 16 日	144,644
8 巡：平成 24 年 5 月 16 日～6 月 18 日	145,295
9 巡：平成 24 年 7 月 4 日～8 月 6 日	148,560
10 巡：平成 24 年 9 月 4 日～10 月 18 日	153,136
11 巡：平成 24 年 10 月 31 日～12 月 7 日	152,960
12 巡：平成 25 年 1 月 9 日～2 月 18 日	142,435
13 巡：平成 25 年 3 月 18 日～4 月 19 日	153,242
14 巡：平成 25 年 6 月 4 日～7 月 8 日	154,560
15 巡：平成 25 年 8 月 27 日～10 月 8 日	155,963
16 巡：平成 25 年 11 月 6 日～12 月 3 日	154,696
17 巡：平成 26 年 3 月 18 日～4 月 22 日	158,506

の 1 つである環境半減期を導出した。福島第一原発事故後 5 年が経過した現時点では、広範囲かつ多頻度で実施された走行サーベイなどにより、生活圏の空間線量率測定データを多く収集することができたため、より適切に住民の生活圏を対象としたモデルパラメータなどの導出・設定を可能にした。表 1 にモデルパラメータの導出・設定に用いた走行サーベイの測定実施日、データ数を示す。表中のデータのうち、文部科学省/原子力規制庁の委託業務で実施した第 1～8 次走行サーベイは福島第一原発から 80km 圏内を、「総合モニタリング計画」(モニタリング調整会議決定)に基づき実施されている走行サーベイは、避難指示区域内を測定対象にしている。

(2)福島第一原発から 80km 圏内のメッシュサイズ

空間線量率の分布状況変化モデルにおいて、福島第一原発から 80km 圏内のメッシュサイズは、空間線量率測定を踏まえた空間線量率分布予測の利便性と信頼性向上を図るうえで、これまでの測定データの単位区画と同等になることが望ましい。 ^{137}Cs の空气中平均自由行程(ガンマ線が空気中の分子と衝突せずに飛行する平均距離)が約 108m であることも勘案し、福島第一原発から 80km 圏内のメッシュサイズは、走行サーベイ測定デー

タの単位区画である第3次地域区画 1/10 細分メッシュ区画に対応する約 100m 単位としている。

(3) 空間線量率の初期値設定

空間線量率の分布状況変化モデルでは、空間線量率の初期値として、福島第一原発から 80km 圏内のメッシュすべてに対して、走行サーベイによる測定データがある場合にはその値を、走行サーベイによる測定データがない場合には走行サーベイと航空機モニタリングによる測定データの相関関係を用いて、航空機モニタリングによる測定データを走行サーベイによる測定相当データに補正した値を適用している。いずれの場合においても、住民の生活圏を対象とすべく、歩行サーベイによる測定データとの比率によって補正している。また、帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域である避難指示区域内では主として「総合モニタリング計画」に基づき実施されている走行サーベイの詳細モニタリング結果を活用している。

(4) モデルパラメータの導出・設定

減衰が遅い成分の環境半減期とその変化の範囲は、レベル 3PRA に関する日本原子力学会の値や米国原子力規制委員会の値(中央値 92 年、45-135 年)を、減衰が速い成分の環境半減期とその変化の範囲は、走行サーベイの空間線量率測定データに対する最小二乗法フィットにより導出した値を用いている。減衰が速い成分の環境半減期は、その信頼性および合理性を図るため、避難指示区域内には陸域観測技術衛星(ALOS)土地利用形態別のうち森林(落葉樹、常緑樹)か否かの群別に、避難指示区域外には ALOS 土地利用形態別に統計解析より導出した。

表 2 に減衰が速い成分の環境半減期について解析した結果を示す。表中の値からは、森林(落葉樹、常緑樹)に分類されたメッシュにおける減衰が速い成分の環境半減期は、他の ALOS 土地利用形態に比べやや長いことが示される。しかし、最新の解析結果では、ALOS 土地利

表 2 減衰が速い成分の環境半減期

ALOS 土地利用形態	減衰が速い成分の環境半減期[年]		
	5% 値	中央値	95% 値
避難指示区域外			
水域	0.25	0.56	1.2
都市	0.35	0.60	1.7
水田	0.32	0.55	1.5
畑地	0.32	0.63	1.9
草地	0.29	0.58	2.2
落葉樹	0.29	0.66	2.7
常緑樹	0.28	0.94	5.7
裸地	0.31	0.62	1.6
避難指示区域内			
森林	0.29	0.68	3.1
森林以外	0.32	0.60	1.7

用形態間の相違は顕著でなく、避難指示区域内外で異なること(避難指示区域外に比べ人間活動が少なかった避難指示区域内の方が、減衰が速い成分の環境半減期は長くなる)が示唆されている。なお、減衰が速い成分の環境半減期の統計分布は、90%信頼区間の分布に着目すると、対数正規分布とみなすことができた。

減衰が速い成分の割合は、避難指示区域内、避難指示区域外それぞれについて、「総合モニタリング計画」に基づき実施されている走行サーベイの詳細モニタリング結果と第 1~8 次走行サーベイの空間線量率測定データを用いて導出した。具体的には、減衰が速い成分の環境半減期を定数とし、初期の空間線量率と減衰が速い成分の割合の 2 つのパラメータを対象にして非線形最小二乗法フィットにより減衰が速い成分の割合を導出した。得られた減衰が速い成分の割合は、避難指示区域内である帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域それぞれの ALOS 土地利用形態別のうち森林(落葉樹、常緑樹)か否かの群別に、避難指示区域外には ALOS 土地利用形態別に分類し、中央値とその変化の範囲を導出した。

減衰が速い成分の割合を表 3 に示す。避難指示区域外の減衰が速い成分の割合は、ALOS 土地利用形態間の相違が顕著である。とくに、常緑樹に分類されたメッシュにおける減衰が速い成分の割合は、都市など他の土地利用形態に分類されたメッシュの値に比べ小さい。また、避難指示区域内である帰還困難区域、居住制限区域、避難指示解除準備区域それぞれの減衰が速い成分の割合については、人間活動などが比較的多い避難指示解除準備区域の方が他の区域に比べ大きく、分散も大きくなる傾向が示された。90%信頼区間の分布に着目すると、いず

表 3 減衰が速い成分の割合

ALOS 土地利用形態 / 属性	減衰が速い成分の割合[-]		
	5% 値	中央値	95% 値
避難指示区域外			
水域	0.53	0.76	0.89
都市	0.52	0.77	0.93
水田	0.53	0.75	0.93
畑地	0.48	0.71	0.89
草地	0.47	0.72	0.92
落葉樹	0.41	0.68	0.88
常緑樹	0.26	0.62	0.86
裸地	0.51	0.73	0.90
避難指示区域内			
帰還困難、森林	0.32	0.45	0.55
帰還困難、森林以外	0.33	0.47	0.57
居住制限、森林	0.37	0.48	0.61
居住制限、森林以外	0.39	0.49	0.65
避難指示解除準備、森林	0.37	0.51	0.67
避難指示解除準備、森林以外	0.29	0.51	0.69

れの減衰が速い成分の割合についても、その統計分布は正規分布とみなすことができた。

3. モデルの不確かさ解析と妥当性検証

(1) モデルの不確かさ解析

空間線量率の分布状況変化モデルを用いて、福島第一原発事故 30 年後までの避難指示区域内外それぞれの空間線量率を予測した。分布状況変化モデルの不確かさ解析では、式(1)に示される 3 つのモデルパラメータである、減衰が速い成分の割合、減衰が速い成分の環境半減期、減衰が遅い成分の環境半減期の統計分布を考慮したモンテカルロ計算により、空間線量率の変化を推定した。減衰が遅い成分の環境半減期の統計分布は先行研究の結果を踏まえ一様分布とした。

分布状況変化モデルにより推定した空間線量率の経時変化の一例を図 1(a)～(c)に示す。避難指示区域外のうち ALOS 土地利用形態が都市に分類されたメッシュを図 1(a)に、避難指示区域内のうち帰還困難区域、避難指示解除準備区域それぞれについて ALOS 土地利用形態が森林(落葉樹、常緑樹)以外に分類されたメッシュを図 1(b)および(c)に示している。いずれもバックグラウンド空間線量率を除く初期の空間線量率で規格化した。図より、分布状況変化モデルにより推定した空間線量率は放射性セシウムの壊変のみを考慮した場合に比べ速く減衰すること、人間活動が少ないほど遅く減衰することが示唆されている。また、図 1(a)～(c)には、規格化して得られた空間線量率の相対値と、第 1～8 次までの走行サーベイや「総合モニタリング計画」に基づき実施されている第 17 巡までの走行サーベイの空間線量率測定データの相対値(測定データからバックグラウンド空間線量率を差し引いた後、初期の空間線量率で除した値)もプロットした。推定した空間線量率の相対値(中央値)は走行サーベイによる空間線量率測定データとよく一致すること、走行サーベイによる空間線量率測定データのほとんどがモデルパラメータの不確かさを考慮した推定値の変化の範囲内にあることが確認できる。

(2) モデルの妥当性検証

空間線量率の分布状況変化モデルの妥当性を検証するため、第 7 次走行サーベイの空間線量率測定データを基準とした分布状況変化モデルを用いて、第 8 次走行サーベイの避難指示区域外の空間線量率を推定・比較した。その比較結果を図 2 に示す。両者は、 $0.1\mu\text{Sv/h}$ 以上となる空間線量率について、係数 2 の範囲で概ね一致することが確認できた。空間線量率が高くなるにつれて、その一致度は良くなっている。なお、 $0.1\sim 0.2\mu\text{Sv/h}$ 程度の空間線量率において、離散的な傾向を示すデータは推定に利用した基準の測定データの有効桁に起因するものである。

(a) 避難指示区域外 (都市)

(b) 避難指示区域内 (帰還困難区域, 森林以外)

(c) 避難指示区域内 (避難指示解除準備区域, 森林以外)

図 1 空間線量率の相対値の経時変化

図 2 空間線量率の分布状況変化モデルによる推定値(第 7 次走行サーベイ基準)と第 8 次走行サーベイの空間線量率測定データとの比較。

図3 空間線量率の分布状況予測図

Ⅲ. 空間線量率の予測図

セシウム 137 の物理的半減期に相当する 30 年を目処に、事故発生 5 年後、10 年後、15 年後、30 年後の福島第一原発から 80km 圏内の空間線量率分布を作図した。空間線量率の初期値には、第 8 次走行サーベイ、「総合モニタリング計画」に基づき実施されている第 17 巡の走行サーベイおよび第 8 次航空機モニタリング(平成 25 年 11 月 19 日時点)の空間線量率測定データを用いた。予測する空間線量率は、分布状況変化モデルに用いる環境半減期などのモデルパラメータ導出データの不確かさを考慮して、バックグラウンド空間線量率を含めた空間線量率 $0.20\mu\text{Sv/h}$ を超えるメッシュに対して行うこととし、数値に対応したグレースケールにより可視化した。なお、 $0.20\mu\text{Sv/h}$ 未満の空間線量率のメッシュについては $0.20\mu\text{Sv/h}$ に対応した明暗と同様にした。猪苗代湖上や福島第一原発から 3km 圏内のような、航空機モニタリングや走行サーベイによる測定データがないメッシュについては白抜きにした。モデルパラメータの中央値を適用した将来予測結果を図 3(a)～(d)に示す。予測した空間線量率は、住民の生活圏を対象にしたものであり、バックグラウンド空間線量率を含めた値である。事故 30 年後の年間 20mSv ($3.8\mu\text{Sv/h}$) を超えるエリアは、事故 5 年後に比べ、約 20 分の 1 程度に減少することが示唆された。

Ⅳ. おわりに

福島第一原発から 80km 圏内を対象に、空間線量率の分布状況変化モデルを開発するとともに、福島第一原発事故後 30 年までの空間線量率分布を予測した。空間線量率の分布状況変化モデルは、環境半減期などのモデルパラメータを用いた計算により、避難指示区域内外それぞれの生活圏において空間線量率分布を簡便に推定する

ことが可能であるため、住民の放射線レベルの理解などに活用できることから、今後の福島復興に役立つと考える。

本稿のおもな内容は、平成 26 年度原子力規制庁の放射性物質測定調査委託費(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及び移行モデルの開発)事業の一環として実施したものである。空間線量率の将来予測図は、原子力機構が当該委託業務を実施する中で得た知見をもとに作成したものである。空間線量率分布の分布状況変化モデルは、今後新たな測定データ・知見が得られれば、その都度見直しを実施し、さらなる検討を加える。

－ 参考資料 －

- 1) 日本原子力研究開発機構、平成 24 年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」成果報告書(2013), <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry05.html>
- 2) 日本原子力研究開発機構、平成 25 年度原子力規制庁委託事業「東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立事業」成果報告書(2014), <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry06.html>
- 3) 日本原子力研究開発機構、平成 26 年度原子力規制庁委託事業「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及び移行モデルの開発」成果報告書(2015), <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/entry07.html>

著者紹介

木名瀬栄(きなせ・さかえ)

日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター/茨城大学 連携大学院
(専門分野/関心分野)放射線防護、とくにファントムの開発と線量評価に関する研究