

放射線の健康影響に係る研究調査事業 令和3年度年次報告書（詳細版）

研究課題名	市街地の空間線量率の経時変化に対する人為的な影響に関する研究
研究期間	令和3年4月1日～令和4年2月28日

	氏名	所属機関・職名
主任研究者	吉村 和也	日本原子力研究開発機構・研究主幹

	氏名	所属機関・職名
研究協力者	町田 昌彦	日本原子力研究開発機構・副センター長
研究協力者	金 敏植	日本原子力研究開発機構・研究員
研究協力者	Alex Malins	日本原子力研究開発機構・研究員
研究協力者	佐久間 一幸	日本原子力研究開発機構・研究員
研究参加者	眞田 幸尚	日本原子力研究開発機構・グループリーダー
研究参加者	阿部 智久	日本原子力研究開発機構・技術員
研究参加者	中間 茂雄	日本原子力研究開発機構・技術副主幹

研究要旨	<p>本研究は、市街地における空間線量率の減少傾向に対する、人間活動の影響を定量的に評価することを目的とし、観測とシミュレーション解析を併せた試験的アプローチ、及びモニタリングデータベースと社会環境データの関係を解析する統計的アプローチの双方から取り組む。本年度は試験的アプローチとして市街地における空間線量率、および¹³⁷Cs沈着量の減少速度と、避難区域や交通量との関係を解析し、特定復興再生拠点の空間線量率は除染の影響により減少が早いこと、¹³⁷Cs沈着量は交通量が多いほど早く減少する可能性が示された。得られた¹³⁷Cs沈着量の減少速度と交通量の関係は、シミュレーション解析に用いるパラメータとして整備した。またこれまでに整備したパラメータにより、市街地の空間線量率が良好にシミュレートできることを確認した。統計的アプローチでは、空間線量率のモニタリングデータについて減少傾向を分析し、地点毎の減少傾向は早い環境半減期で特徴づけられることが確認された。得られた環境半減期（減少速度）は、土地利用区分や流動人口データと有意な相関を示し、広域でも空間線量率の低減に人間活動が寄与していることが示された。</p>
キーワード	空間線量率、 ¹³⁷ Cs 沈着量、経時変化、市街地、人間活動

I 研究目的

空間線量率の減少傾向は、住民の被ばく線量評価、避難区域の設定など、各種放射線防護において重要であると同時に、帰還した、ないしは帰還を予定する住民とのリスクコミュニケーションに有用な情報である。特に住民が大半の時間を過ごす市街環境において、空間線量率の減少傾向は、上述の放射線防護やリスクコミュニケーションといった環境行政の点で大きな関心ごとである。

従来の研究により、空間線量率の減少速度は市街地で他の環境よりも早いことが報告されている¹⁻³⁾。また空間線量率は、市街地の主要な被覆要素である舗装面で、草地や土壌などの非舗装面よりも速やかに減少することがヨーロッパ⁴⁻⁶⁾や福島県^{7,8)}で示されている。以上の情報は、被ばく線量の推定モデルにおいて重要なパラメータとなる^{9,10)}。この市街地における空間線量率の低減要因として、人間活動の影響が間接的に示唆されているが^{2,3,11)}、これを直接的に評価した研究はこれまでに報告されていない。

本研究は、空間線量率の経時的な減少に対する人間活動の影響を定量的に評価することを目的とし、空間線量率の減少とその要因を直接的に実証するための現地観測調査とシミュレーション解析による評価、および空間線量率の減少と人間活動の関係を広域で評価するためのモニタリングデータベースを活用した解析を実施する。人間活動の影響としては、除染や道路清掃や車両の通行に伴う路面の摩耗、住民や自治体による清掃活動などが考えられるが、直接的に評価できる項目として、現地観測調査では除染と交通量に着目し、空間線量率の減少傾向との比較を行う。またデータベースを活用した解析では、人間活動を表す指標として土地利用、及び流動人口に着目し、空間線量率の減少との関係解析を行う。さらに、線源となる¹³⁷Csの動態に対する人間活動の影響を併せて評価することで、空間線量率の低減メカニズムについて理解、実証することを目的とする。本年度は試験的アプローチとして、市街地における空間線量率や¹³⁷Cs沈着量の経時変化と、人間活動を表す指標として着目した避難指示区分や交通量との関係性を評価すると共に、空間線量率のシミュレーションに必要な実測値に基づくパラメータやモデルといった解析環境を整備することを目的とした。併せて統計学的アプローチとして、モニタリングデータベースを用いた統計解析に必要なデータセットを整備すると共に、モニタリングデータを用い空間線量率の減少速度を評価することを目的とした。

II 研究方法

本研究では、市街地において空間線量率、および¹³⁷Cs沈着量をモニタリングし、その減少傾向と人間活動の関係を評価するとともに、シミュレーション解析と合わせることで、空間線量率の減少要因の評価、空間線量率の将来予測を行う。また、これまでに各種事業で蓄積されてきたモニタリングデータベースと、土地利用や人流データなどの社会環境データについて関係解析を行う。モニタリング調査、シミュレーション解析、データベースを用いた解析それぞれの方法について以下に述べる。

1) モニタリング調査

本調査では、空間線量率、及び¹³⁷Cs沈着量の経時的な減少速度を実測値に基づき求め、この減少速度と避難指示区分や交通量との関係を解析する。調査地を図1に示す。空間線量率、および¹³⁷Cs沈着量の経時変化を評価するための調査は、大熊町、富岡町を対象に、人間活動量が異なる

帰還困難区域、特定復興再生拠点、居住区域に該当するエリアを試験サイトとして実施した。

空間線量率は、KURAMA-II システムを用い歩行サーベイにより、令和3年9月14～22日、および令和4年1月19～24日の2回測定した。KURAMA-II システムは、30～2,000 keV の γ 線計数率と GPS 座標を3秒間隔で取得し、外部サーバに転送、保管する。システムや計数率から空間線量率への変換などデータ処理の詳細は、Andoh ら¹²⁾により報告されている。測定された空間線量率データは、地理情報システム (ArcGIS, ESRI 社) により 100 m 四方のメッシュ内の平均値に加工し、解析に用いた。

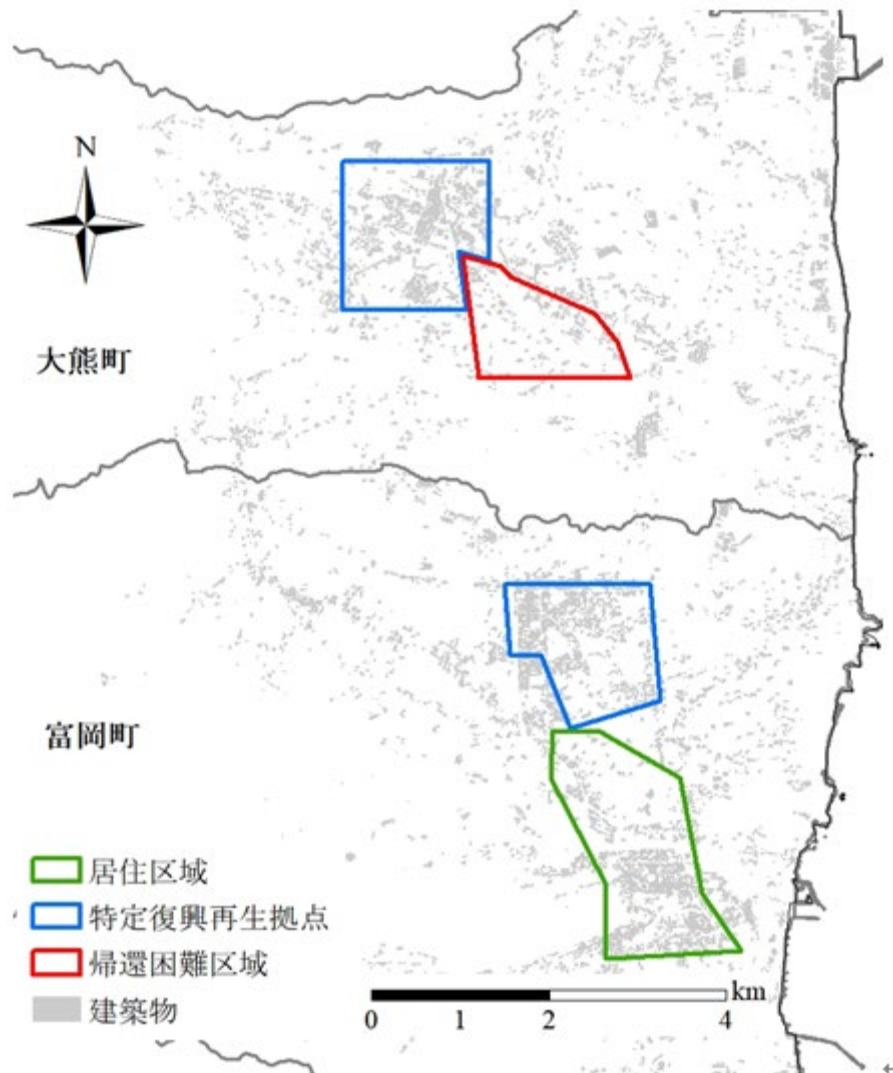


図 1 調査地

^{137}Cs 沈着量は、円筒型コリメータ (30 mm 厚、鉛製) を備えた可搬型ゲルマニウム半導体検出器 (Falcon-5000, CANBERRA, USA) を用い、表 1 に示す特定復興再生拠点、及び帰還困難区域内の 16 地点で測定した。測定は令和3年9月14日～15日、および令和4年1月17日～18日の2回実施した。検出器は三脚を用いて測定点の地上 1m 高に保持し、30 分間測定した。得られた γ 線スペクトルは、In-Situ Object Calibration Software (ISOCS, CANBERRA, USA) を用いて解析し、 ^{137}Cs 沈着量を求めた。解析に用いるパラメータとして、緩衝深度は 0.1 g cm^{-2} 、測定対象であるア

スファルトの密度は 2.35 g m^{-3} とした¹³⁾。

交通量調査は、実際の交通量の多寡を考慮し表 1 のサイト No.3、6、10、13-15 の計 6 地点において、令和 3 年 8 月 2~31 日、および令和 3 年 12 月 20~23 日に録画した動画（24 時間）を用い集計した。集計の際には、四輪車のみを対象とした。

表 1 ^{137}Cs 沈着量測定地点（○で示した特定復興再生拠点は、令和 3 年度 4 月時点で避難指示が解除され、住民に開放された区域を示す。）

サイト No.	自治体	試験サイト区分	測定対象	緯度	経度
1	大熊町	特定復興再生拠点	駐車場	37.4048	140.9825
2	大熊町	特定復興再生拠点	道路	37.4043	140.9820
3	大熊町	特定復興再生拠点	道路	37.4035	140.9826
4	大熊町	特定復興再生拠点	駐車場	37.4042	140.9834
5	大熊町	○ 特定復興再生拠点	道路	37.4037	140.9819
6	大熊町	帰還困難区域	道路	37.3965	140.9775
7	大熊町	特定復興再生拠点	駐車場	37.4051	140.9774
8	大熊町	帰還困難区域	駐車場	37.3977	140.9901
9	大熊町	帰還困難区域	道路	37.3969	140.9993
10	大熊町	帰還困難区域	道路	37.3942	141.0019
11	富岡町	帰還困難区域	駐車場	37.3653	141.0322
12	富岡町	○ 特定復興再生拠点	道路	37.3716	141.0072
13	富岡町	○ 特定復興再生拠点	道路	37.3705	140.9669
14	大熊町	○ 特定復興再生拠点	道路	37.4125	140.9907
15	大熊町	○ 特定復興再生拠点	道路	37.4103	140.9773
16	大熊町	帰還困難区域	駐車場	37.4124	140.9910

2) シミュレーション解析

空間線量率の減少要因の評価や将来予測を目的とするシミュレーション解析は、環境中空間線量率 3 次元分布計算システム（3D Air Dose Rate Evaluation System:略称 3D-ADRES¹⁴⁾）により環境モデル（地形・樹木・建物などの構造物、及び線源分布を再現したモデル）を作成し、これを Particle and Heavy Ion Transport code System（PHITS）に入力して実施する。解析対象となるモデルサイトは、図 2 に示す大熊町の帰還困難区域試験サイトに位置する一区画に設定した。本年度は、モデルサイトでの環境モデルを作成すると共に、試験的に空間線量率分布のシミュレーションを実施した。シミュレーション結果は、図 2 に示された拓けた土壌面 6 地点（S1~6）、舗装面 6 地点（P1~6）、雑木の林床 6 地点（F1~6）の計 18 地点で、昨年度に NaI サーベイメータにより測定した 1m 高さの空間線量率を用いて検証した（表 2）。

環境モデルは、まず計算領域を区切るメッシュを作成した後、家屋などの環境要素を作成し、次いでメッシュに線源を付与する。メッシュは家屋、舗装面、他領域それぞれを対象に作成した（図 3）。また環境要素として樹木、家屋、土地利用をモデルに付与し、PHITS 形式の 3D モデルを作成した（図 4）。場の空間線量率をシミュレーションするため、作成した 3D モデルにある道

路や家屋、樹木といった環境要素には、昨年度に歩行サーベイにより取得した地上 100cm 高の空間線量率測定値を元に、Kim et al. (2019) ¹⁴⁾を参考に線源 (¹³⁴Cs、¹³⁷Cs) を設置した。

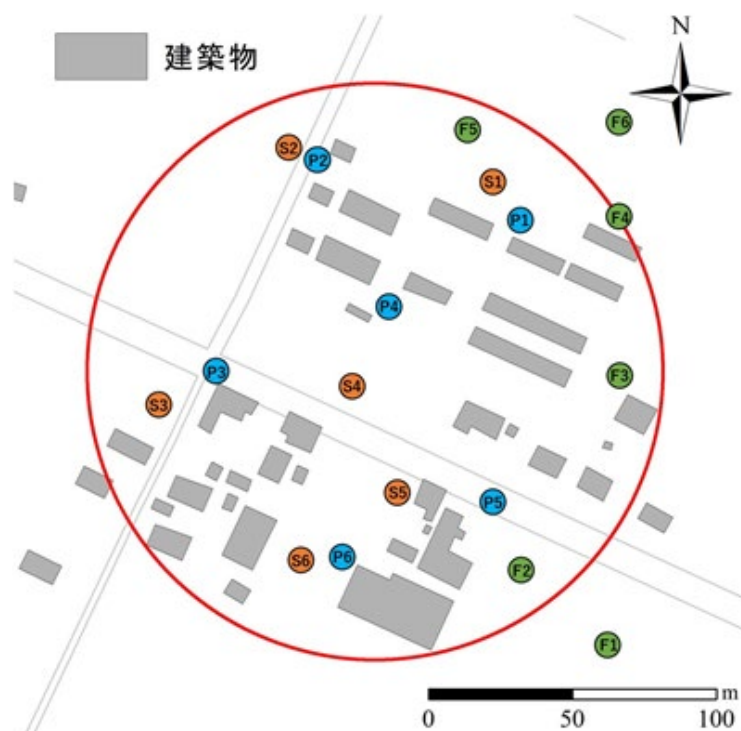


図 2 シミュレーション解析の対象となるモデルサイト

表 2 シミュレーション結果の検証に用いた空間線量率と測定地点

No.	緯度	経度	測定値 ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)
P1	37.39698446	140.9993084	0.99
P2	37.39705484	140.9984749	1.13
P3	37.39646118	140.9981288	0.92
P4	37.39664802	140.9987622	1.21
P5	37.39604248	140.999186	1.02
P6	37.39582045	140.998594	1.06
S1	37.39707749	140.9991523	2.16
S2	37.39710094	140.9983345	2.03
S3	37.39631444	140.9977909	1.99
S4	37.39640726	140.9985386	1.76
S5	37.39605553	140.9989383	1.85
S6	37.39587576	140.9984267	1.95
F1	37.39555835	140.9996823	1.91
F2	37.39583197	140.9993477	1.54
F3	37.39636918	140.9996949	1.91
F4	37.39690974	140.9997033	1.59
F5	37.3971867	140.9990299	2.23
F6	37.39718002	140.9997074	1.91

①家屋メッシュの作成



②舗装面メッシュの作成



③他領域メッシュの作成

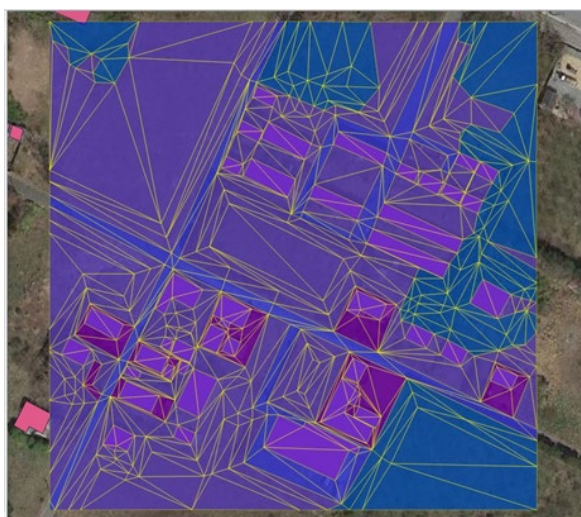


図 3 計算領域メッシュの作成

(衛星画像: Google, ©2022 TerraMetrics/ Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO)

①樹木データの付与



②家屋データの付与



③土地利用データの付与



④PHITS 形式の 3D モデル作成

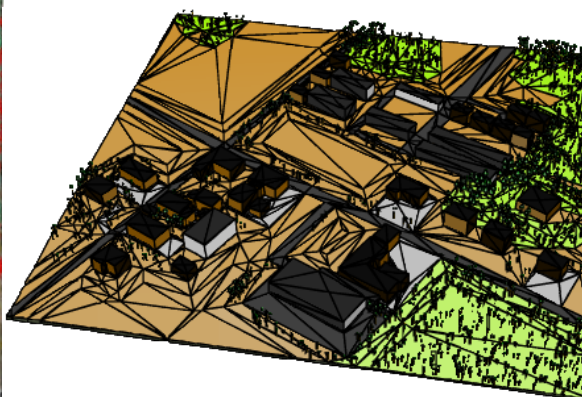


図 4 環境要素の付与と 3D モデルの作成

(衛星画像: Google, ©2022 TerraMetrics/ Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO)

3) データベースを用いた解析

空間線量率は総合モニタリング計画の中で様々な手法と時間・空間的な解像度により、事故直後から継続してモニタリングされてきた。本研究ではこのうち、事故後の比較的初期から広域で継続的にデータを集積してきた文部科学省、原子力規制庁による走行サーベイデータ¹を用い、空間線量率の減少傾向を評価すると共に、人間活動を表す社会環境データとの関係解析を行う。

¹ 放射性物質モニタリングデータの情報公開サイト (<https://emdb.jaea.go.jp/emdb/>)

本年度は、昨年度に引き続き走行サーベイデータのクレンジングを行うと共に、クレンジングしたデータについて空間線量率の減少傾向を分析し、得られた減少速度（環境半減期）と人間活動を反映する社会環境データとの関係解析を行った。

データのクレンジングは、クラスター分析により一般的な挙動と異なる経時変化を示す地点のデータ（はずれ値）を抽出した。クラスター分析には、クラスターの個数が事前にわからない場合や、はずれ値の特定に有効な手法であり、計算コストが低い“Density-based”の DBSCAN¹⁵⁾を用いた。クラスターリングは、空間線量率の各測定地点での時系列データを対象とし、時系列データどうしの相同性（類似性）によりクラスターリングが行われることになる。

空間線量率の減少傾向（環境半減期）は、機械学習法（LASSO）を用い、指数関数線形モデルをフィッティングすることで評価した。このモデルは、一定の範囲・一定数個の減衰係数を持つ指数関数を用意し、その線形和により時間(t)における減衰した空間線量率 ($D(t)$, $\mu\text{Sv h}^{-1}$) を表現するものであり、式 1 により表される。

$$D(t) = c_0 + \frac{k \exp(-\lambda_{134}t) + \exp(-\lambda_{137}t)}{k+1} \sum_{i=1}^{N_e} c_i \exp(-\lambda_i t)$$

$$= c_0 + \frac{k \exp(-\lambda_{134}t) + \exp(-\lambda_{137}t)}{k+1} \mathbf{C}^T \mathbf{E}(t)$$

式 1

- k 初期空間線量率比 ($^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$)
- λ_{134} ^{134}Cs の壊変定数[1/year]
- λ_{137} ^{137}Cs の壊変定数[1/year]
- N_e 指数関数の数
- λ_i 減衰係数[1/year]($i = 1, \dots, N_e$)
- c_i 指数関数の係数($i = 0, 1, \dots, N_e$)[$\mu\text{Sv/h}$]
- \mathbf{C} $(c_1, \dots, c_{N_e})^T$
- $\mathbf{E}(t)$ $(\exp(-\lambda_1 t), \dots, \exp(-\lambda_{N_e} t))^T$

このモデルでは、 N_e および λ_i は外部から与えるパラメータであり、 N_e は 50、 λ_i の最小値 (λ_1) ~ 最大値 (λ_{N_e}) の範囲は $[\log(2)/50] \sim [\log(2)/0.1]$ とした。測定データを用いて学習するパラメータは、 c_i およびバックグラウンド空間線量率に相当する c_0 である。これにより、各地点における空間線量率の時系列データについてフィッティングされた指数関数線形モデルから、空間線量率の減衰を表す環境半減期を求めた。

空間線量率の減少速度と人間活動の関係を評価するため、社会環境データとして土地利用平面図、及び人口の移動をモニタリングした流動人口データを整備し、相関解析を行った。土地利用平面図データは、原子力機構により公開されている土地利用データ（高解像度土地利用土地被覆図データ（2014年2月版））²とした。また携帯のGPS情報から取得される流動人口データには、

² 高解像度土地利用土地被覆図データ (https://emdb.jaea.go.jp/emdb_old/selects/y20103/)

内閣府が「地域経済分析システム RESAS」³にて提供する「まちづくりマップ 流動人口メッシュ」を用いた。「流動人口メッシュ」では、500m メッシュを対象地域全域に設定し、この 500m メッシュ毎の流動人口に基づきマップが作成されている。本研究ではこのメッシュデータを福島県全域について取得し、数値化した流動人口データを作成した(図 5)。数値化した流動人口の最大値は、10,000 程度であった。

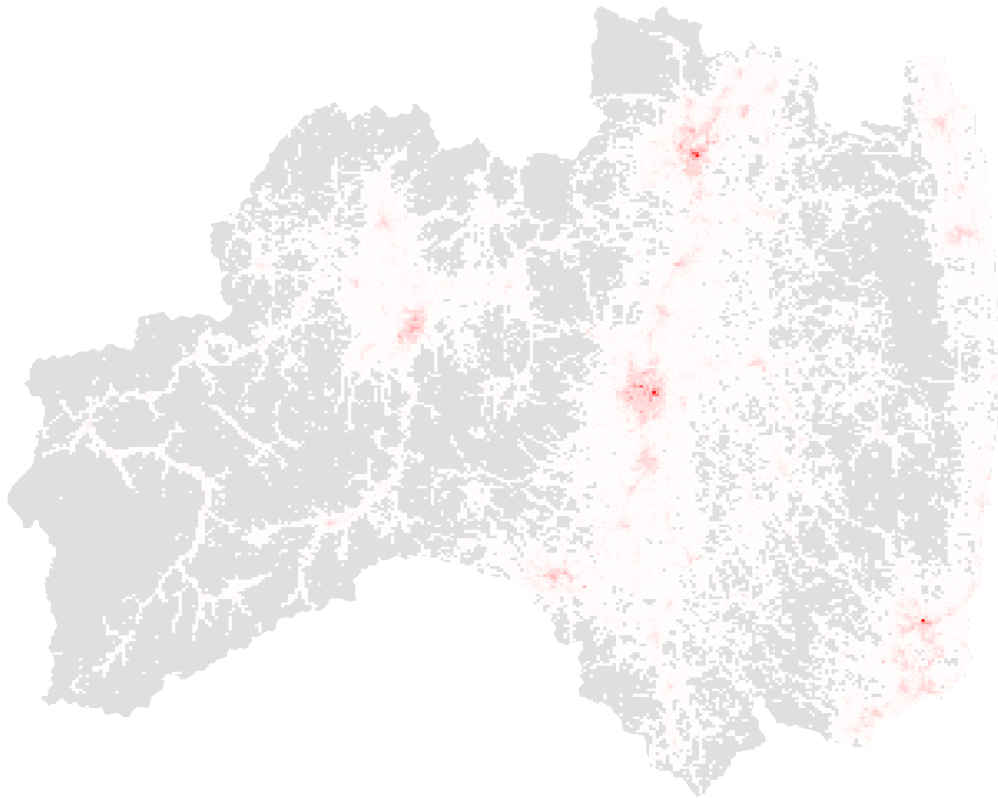


図 5 流動人口データ (0～最大値を白～赤で描画、ただし 0 の地点は灰色)

(倫理面への配慮)

本研究は、公共の場における空間線量率等の環境放射能を測定するとともに、公開済みのデータベースを活用するものであり、倫理面への配慮が必要となる作業を含まない。

III 研究結果

1) モニタリング調査

①空間線量率

本研究において点データとして取得された空間線量率は、地理情報システムを用い 100m メッシュの平均値として加工し、解析に供している。一例として、メッシュデータに加工して得られた大熊町の特設復興再生拠点における空間線量率の分布マップを図 6 に示す。当該エリアで取得

³ 内閣府、地域経済分析システム RESAS (<https://resas.go.jp/#/7/07201>)

されたメッシュ数は 130 超であり、この高い空間解像度により、局所的な空間線量率の分布と、その変化傾向の可視化が可能となった。得られた空間線量率の分布とその変化傾向は、大熊町が運営する、リスクコミュニケーションを目的とした「環境情報サイネージ」のコンテンツとして採用され、オンライン上で公開されている⁴。

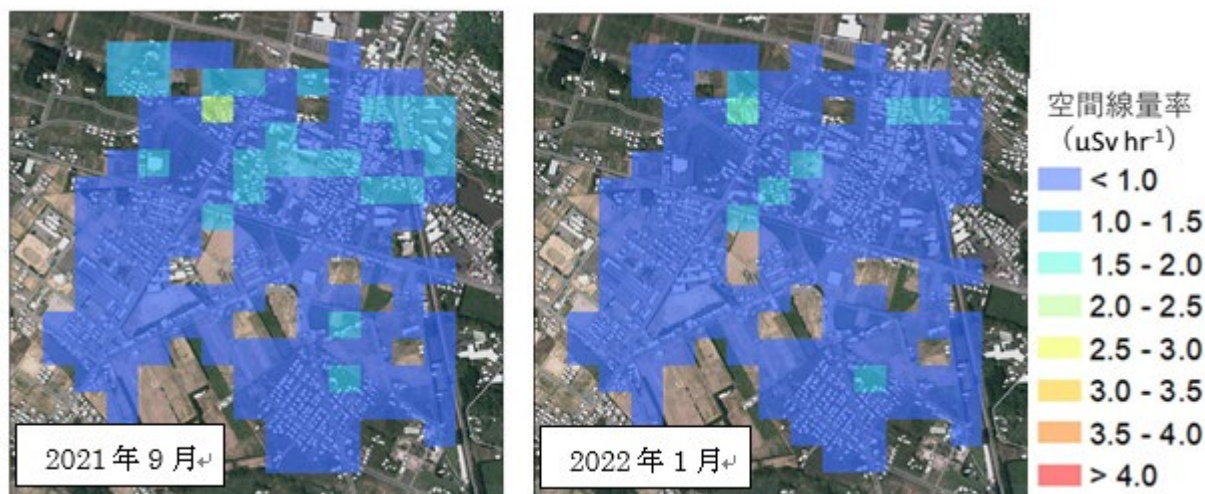


図 6 大熊町の特定復興再生拠点における空間線量率の分布マップ
(国土地理院撮影の空中写真を使用)

避難指示区分ごとに求めた空間線量率平均値の経時変化を図 7 に示す。なお、人工放射性核種（主に ^{134}Cs 、 ^{137}Cs ）に由来する空間線量率の経時変化を評価するため、データはバックグラウンドの空間線量率（大熊町で $0.074 \mu\text{Sv h}^{-1}$ 、富岡町で $0.059 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ¹⁶⁾を差し引いた値としている。データ数が十分な特定復興再生拠点、居住区域について空間線量率の減少速度⁵を求めた結果、それぞれ -0.291 year^{-1} 、 -0.166 year^{-1} であった。

帰還困難区域における空間線量率の減少傾向を比較するため、帰還困難区域での調査を開始した 2021 年 1 月の空間線量率に対する、2022 年 1 月の相対値を比較した（図 8）。相対値が最も低かったのは、減少速度が最も速い特定復興再生拠点（83.4%）であり、直近の 1 年間でも除染の進捗に伴い速やかに減少していることが確認された。人間活動のある居住区域の相対値は 87.9%と、人間活動が限定的な帰還困難区域（90.5%）よりも低い値となった。

⁴ 大熊町環境情報サイネージ (<https://www.okuma-signage.jp/>)

⁵ 減少速度 (λ) は次式により定義される。

$$[\lambda = \ln(2)/t_{1/2}]$$

ここで $t_{1/2}$ は半減期を意味する。本解析における減少速度は、事故由来の放射性核種の物理壊変、及びその他のウェザリング効果（地面における放射性核種の下方浸透と水平方向への洗い流し）の影響を含んでおり、指数関数をフィッティングして得た傾きとして求めた。

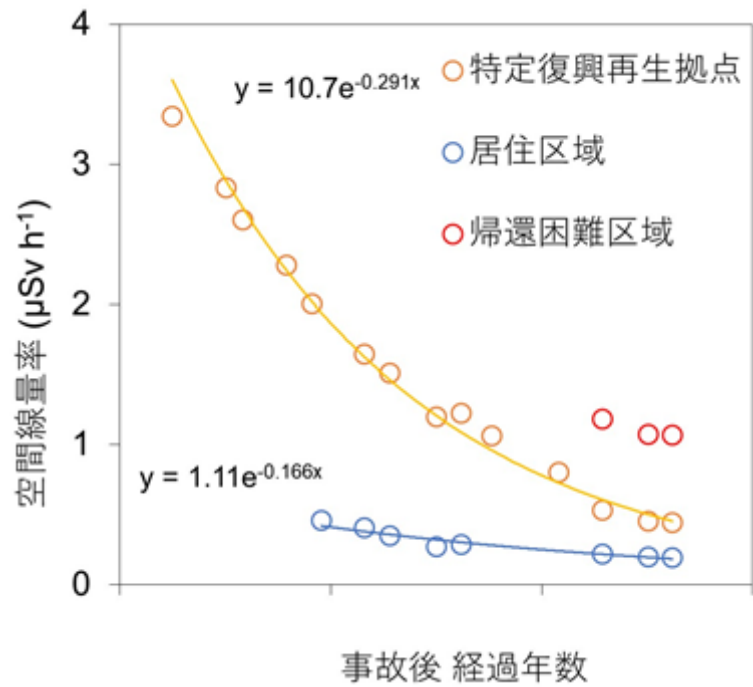


図 7 避難指示区分ごとの空間線量率経時変化

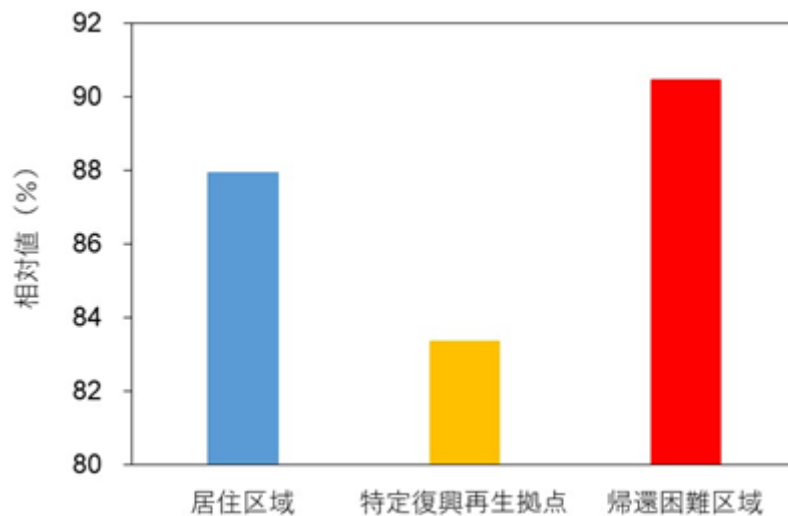


図 8 2021 年 1 月の空間線量率に対する 2022 年 1 月の相対値

②¹³⁷Cs 沈着量

舗装面における ¹³⁷Cs 沈着量の経時変化について、沈着量が大きく異なる地点間のデータを統合して解析するため、本研究では ¹³⁷Cs 沈着量を初期沈着量（第 4 次航空機モニタリング¹⁷）で得られた 2011 年 11 月 5 日時点の値）で基準化した相対値として解析を行った。過年度データも併せた除染後、及び未除染の地点における ¹³⁷Cs 沈着量の経時変化を図 9 に示す。¹³⁷Cs 沈着量は時間の経過と共に減少し、減少速度は除染の前後でそれぞれ -0.178 year^{-1} 、 -0.251 year^{-1} であり、除染後の地点で減少が早い傾向にあった。

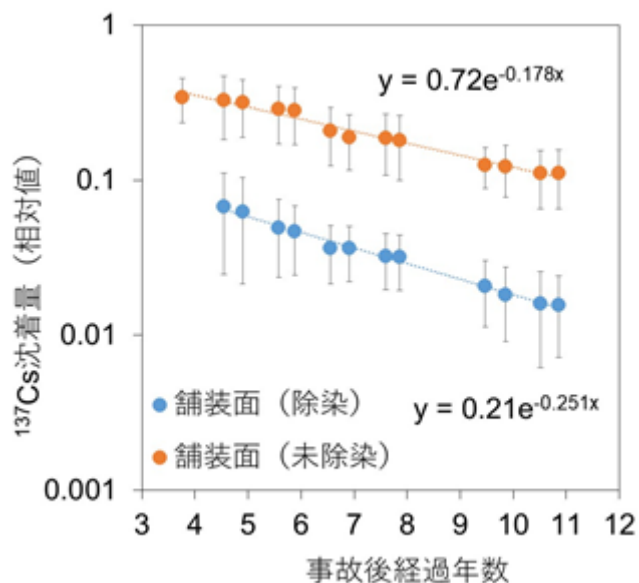


図 9 ^{137}Cs 沈着量（初期沈着量に対する相対値）の経時変化

^{137}Cs 沈着量の減少に対する人間活動の影響を評価するため、帰還困難区域、及び特定復興再生拠点内の避難指示が解除された地点で、かつ本研究期間（令和 2～3 年度）の間に除染の影響を受けていない地点（表 1 の No. 9～16）について、 ^{137}Cs 沈着量の減少速度を評価した（図 10）。減少速度は、帰還困難区域と避難指示が解除された区域でそれぞれ -0.089 year^{-1} 、 -0.224 year^{-1} であった。

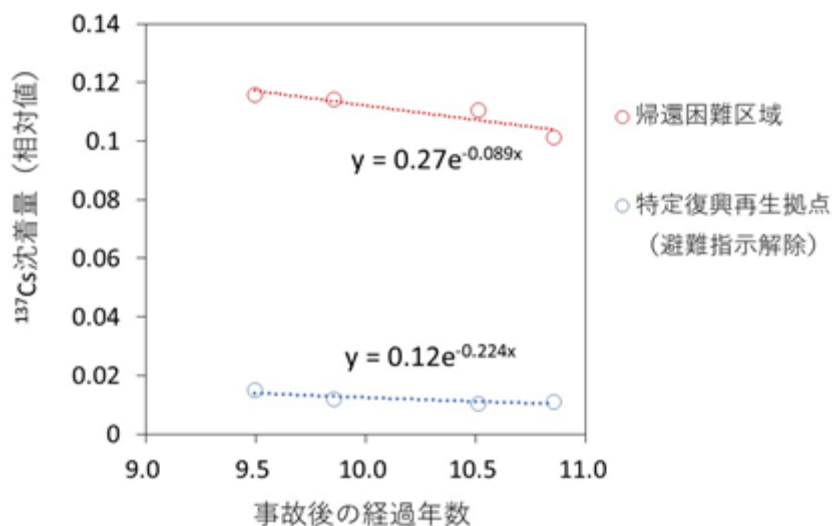


図 10 帰還困難区域、及び避難指示が解除された区域における ^{137}Cs 沈着量の経時変化

③交通量調査

交通量調査の結果を表 3 に示す。令和 2 年度から 3 年度にかけて計数した終日の交通量は平均で 9～4,431 台の範囲で変動していた。これら 6 地点のうち、除染の影響を受けていない 5 地点（No.3、10、13-15）について、交通量調査を実施した 2020 年から 2022 年にかけて ^{137}Cs 沈着量の減少と交通量の間を評価した（図 11）。 ^{137}Cs 沈着量の減少と交通量の間には、弱い有意性（相関係数=0.68）ながらも、正の相関が確認された。

表 3 交通量調査結果（避難指示区分における○は、令和 3 年度 4 月時点で避難指示が解除された地点を示す。）

サイト No.	避難指示区分	交通量			平均
		2020/12/16-22	2021/8/2-31	2021/12/20-23	
3	特定復興再生拠点	2,364	1,243	1,787	1,798
6	帰還困難区域		218	119	169
10	帰還困難区域		13	4	9
13	○特定復興再生拠点	2,236	1,510	1,711	1,819
14	○特定復興再生拠点	5,075	4,045	4,174	4,431
15	○特定復興再生拠点	1,640	1,716	2,166	1,841

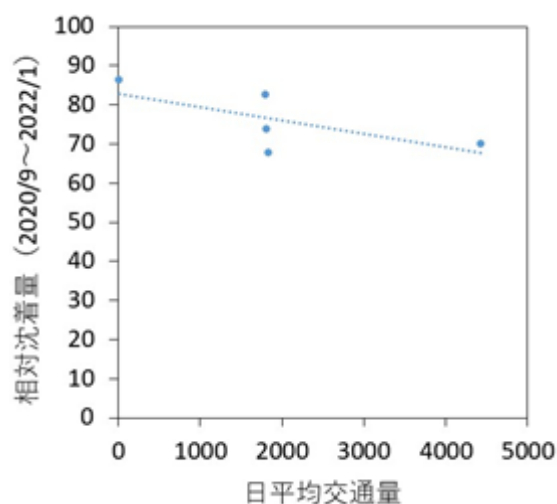


図 11 日平均交通量と 2020 年 9 月の ^{137}Cs 沈着量に対する 2022 年 1 月の相対値

2) シミュレーション解析

本シミュレーションでは、家屋や樹木などの環境要素ごとにモデルを作成・線源を設置し、空間線量率を計算しているため、各環境要素に由来する空間線量率を評価することが可能である。空間線量率のシミュレーション結果を図 12 に示す。モデルサイトの空間線量率は、主に地面に由来しており、家屋や樹木の影響が限定的であることが確認された。

空間線量率のシミュレーション結果の検証のため、昨年度に空間線量率を測定した 18 地点について、空間線量率の実測値と計算値を比較した（図 13）。空間線量率の推定値は実測値と高い相関を示し、3D-ADRES によりモデルサイトの空間線量率の空間変動が良好に再現できることが確認された。一方、相関式の傾きは 0.76 であり、推定値は実測値を 24%ほど過小評価していることが確認された。

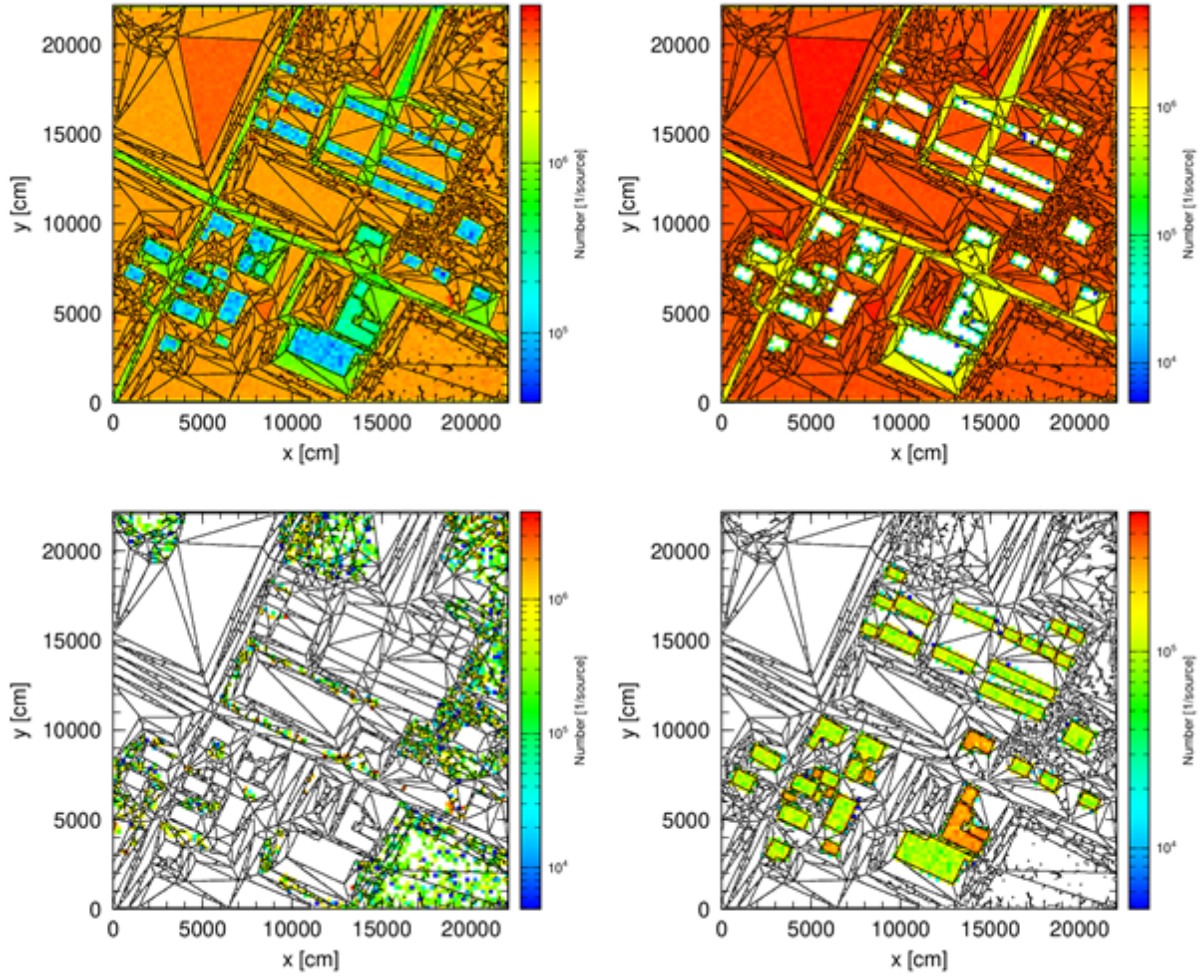


図 12 3D-ADRES による空間線量率シミュレーション結果 (左上：合計，右上：地面，左下：樹木，右下：家屋などの人工物)

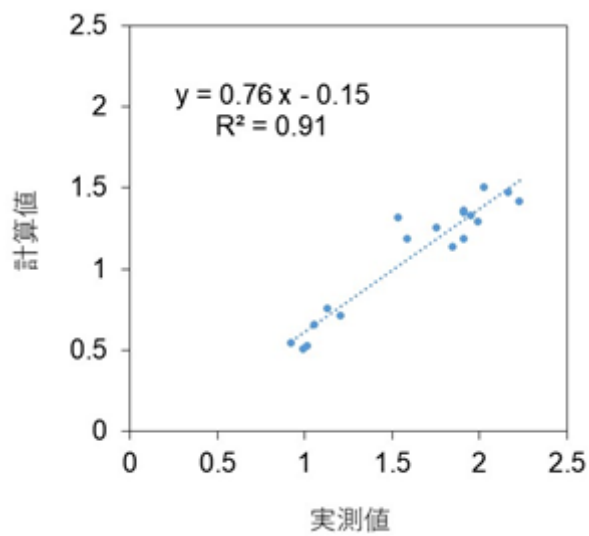


図 13 空間線量率の実測値と 3D-ADRES による計算値の比較

3) データベースを用いた解析

クラスター分析により、最も大きなクラスター1、およびはずれ点に分類された時系列データを図 14 に示す。はずれ点に分類された時系列データ数は 17,629 と、クラスター1 の 4,549 に比較して多いものの、クラスター1 にははずれ点のようにデータの不自然な増減が少ない、概ね素性のよい時系列データを得ることができた。

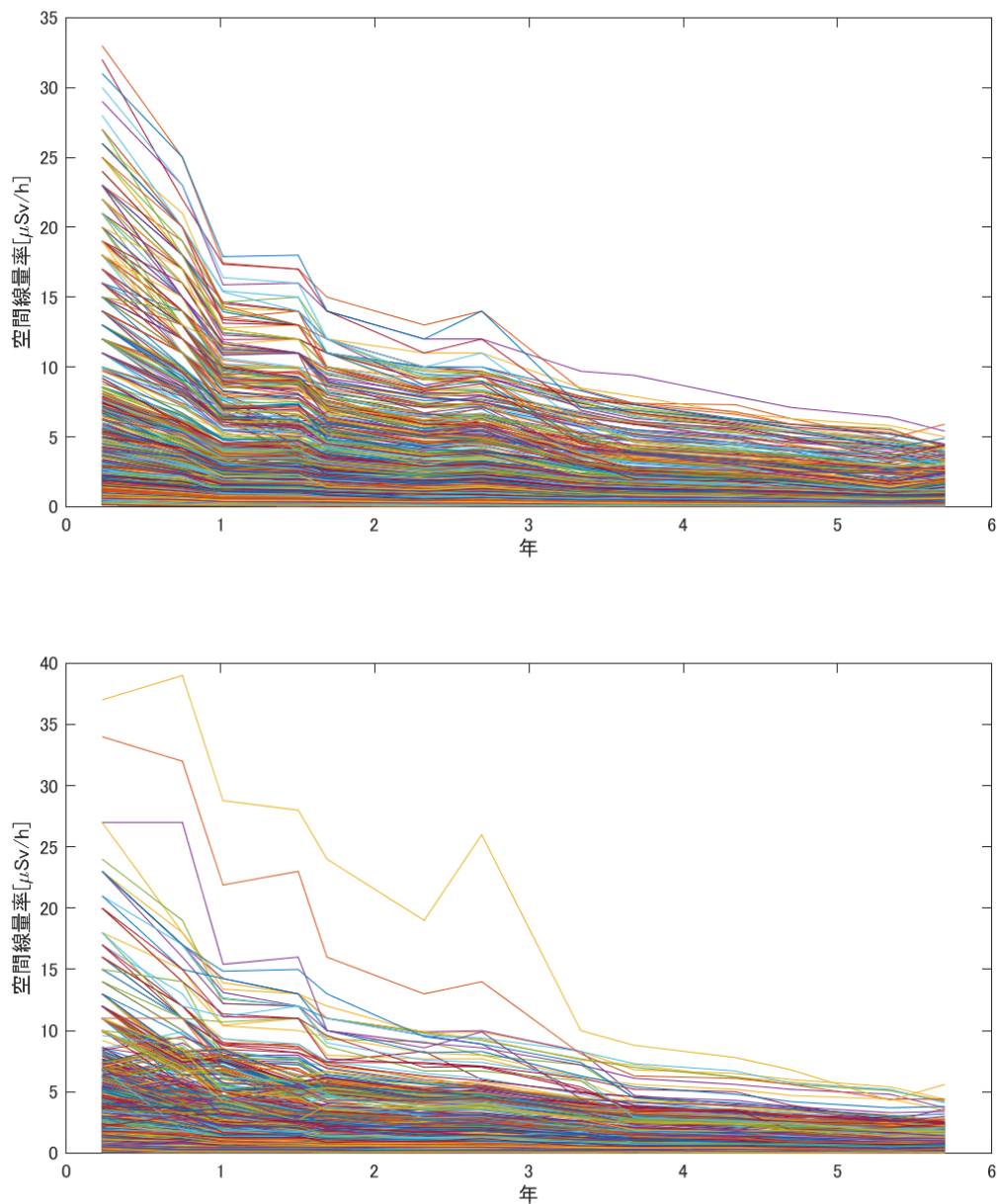


図 14 クラスター分類後の時系列データ
(上：サイズの大きいクラスター1 (要素数 4549)、下：はずれ点 (17629))

クレンジングを行った時系列データについて、LASSOにより評価した環境半減期の散布図を図 15 に示す。図中の縦軸は環境半減期 (対数スケール)、横軸は観測地点を表し、環境半減期の重み

付き平均値の小さい順に左から右へと並べている。また平均環境半減期（減少速度の重み付き平均値の逆数 $\times \log 2$ ）を赤でプロットした。全体として早い環境半減期（1年未満）と遅い環境半減期（5～20年）が確認された。遅い環境半減期は観測地点により大きくは変わらないものの、早い環境半減期は地点によって異なっていた。また横軸で 2.1×10^4 付近にある観測地点は、早い環境半減期がなく遅い環境半減期のみで表された。

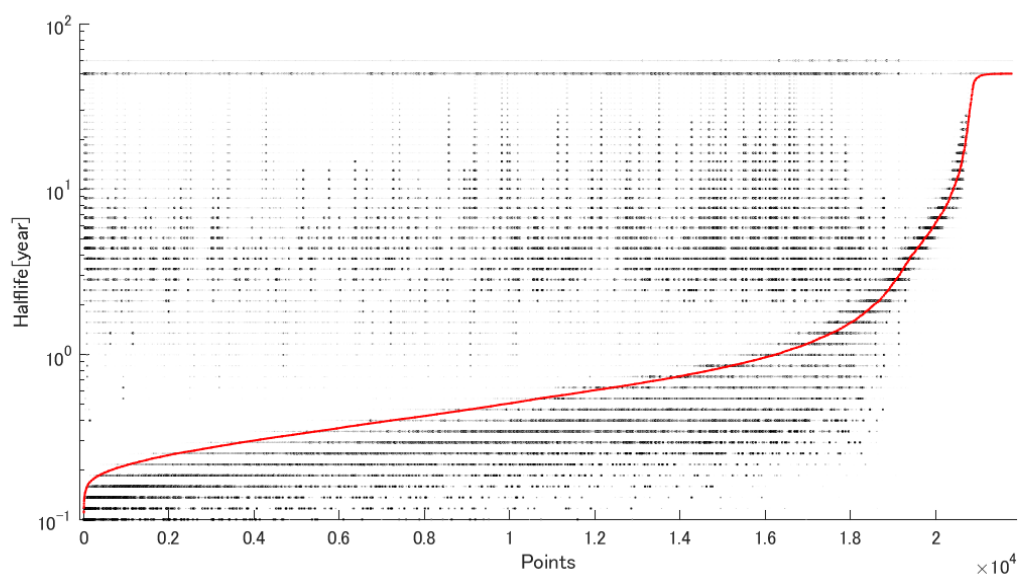


図 15 LASSO により求めた環境半減期の散布図

図 15の赤線で表される平均環境半減期から求めた平均減少速度を土地利用ごとに求めた（表 4）。平均減少速度は、人間活動のある都市域で最も早く、人間活動の限定的な森林や水域で低い値となった。また平均減少速度と流動人口数との相関図を図 16に示す。図からは相関関係が分かりづらいが、相関係数（ 1.40×10^{-1} ）およびp値（ 7.35×10^{-98} ）からは、平均減衰係数と流動人口との間に正の相関が弱いながらも確認された。

表 4 土地利用区分ごとの平均減衰係数

土地利用区分	地点数	平均減少速度 (year ⁻¹)
水域	85	1.098
都市	5174	1.599
水田	5738	1.377
畑地	3991	1.402
草地	906	1.357
落葉樹	4521	1.307
常緑樹	1926	1.178
裸地	45	1.388

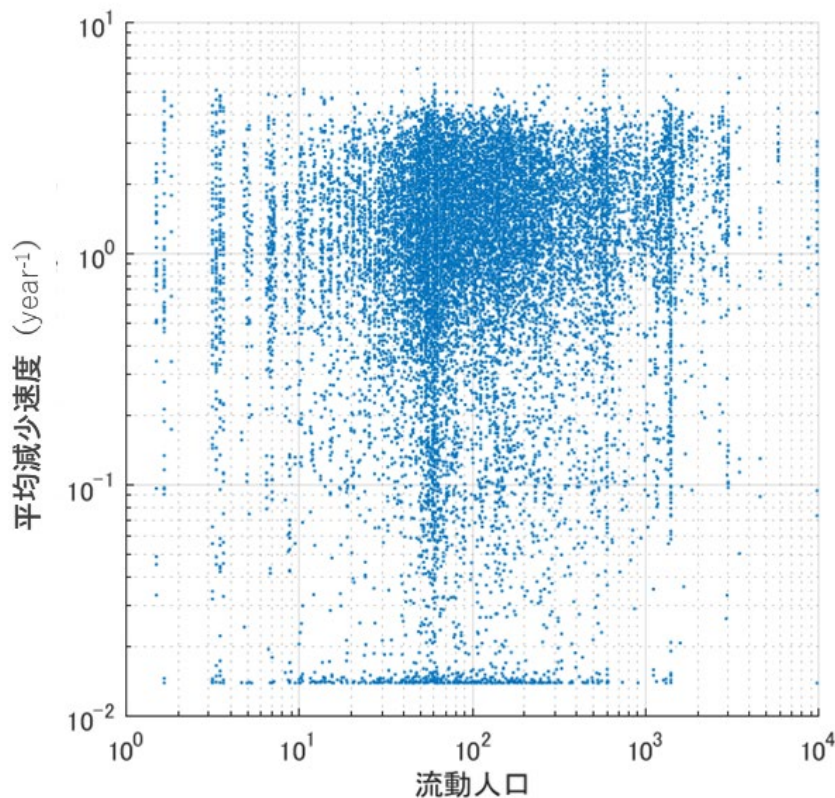


図 16 流動人口と平均減少速度の関係

IV 考察

特定復興再生拠点、居住区域における空間線量率の減少速度は、それぞれ -0.291 year^{-1} 、 -0.166 year^{-1} であり、いずれも ^{137}Cs の物理減衰に伴う減少速度 (-0.023 year^{-1}) よりも速やかな値が示された。以上の結果は、放射性セシウムのウェザリング効果（水平方向への流失、および土壌深度方向への移動）により、空間線量率の減少が促進されていることを示す。また、減少速度が特定復興再生拠点で居住区域よりも早かったのは、主に当該区域内で実施された除染によるものと考えられる。仮に特定復興再生拠点、居住区域における空間線量率の減少速度の差が除染に起因しており、両地域に置けるウェザリング効果、放射性核種の物理壊変に伴う空間線量率の減少速度が同等とした場合、人間活動の一つである除染による空間線量率の減少速度は、両地域の減少速度の差として -0.125 year^{-1} と見積もられる。この減少速度は特定復興再生拠点の開放に向けて除染が行われた市街環境において、実測値に基づいて得られた値であり、除染に伴う空間線量率の減少を推定するのに実際的なパラメータとなると考えられる。

除染以外の、日常的な人間活動の影響を評価するため、人間活動のある居住区域と人間活動が限定的な帰還困難区域において、2021年1月から2022年1月にかけての空間線量率の減少を評価した結果、居住区域で速やかな減少が確認され、従来の報告¹⁻³⁾と符合した。また本研究では、避難指示が解除された地点で帰還困難区域よりも速やかな ^{137}Cs 沈着量の減少が確認された。以上の結果は、人間活動が放射性セシウムのウェザリング効果に寄与し、その結果空間線量率の低減を促進

していることを示唆する。

日常的な人間活動の一つとして、交通量に着目し¹³⁷Cs沈着量の減少との関係を解析した結果、交通量と¹³⁷Cs沈着量の減少の間には有意性が低いものの弱い正の相関が示された。本解析における沈着量の評価期間は1年4か月と非常に限定的であるため、相関が弱かった可能性があるが、今後、より長期のモニタリング結果を用いて同解析を行うことで、その関係が明らかになると考えられる。

以上、避難指示区分ごとの空間線量率の減少速度や、交通量に伴う¹³⁷Cs沈着量の減少速度は、次年度のシミュレーション解析におけるパラメータとして供するため、調査の継続によりパラメータのアップデートを行う予定である。

モデルサイトの空間線量率の空間的な変動は、3D-ADRESにより良好に再現された一方、空間線量率の推定値自体は、実測値に比較し約24%の過小評価となった。その原因として、地面への線源の設定が、十分に現場を再現していなかった可能性がある。次年度は、この線源設定方法について改良した後、人間活動と放射性セシウムの減衰を考慮したシミュレーションを実施する予定である。

地面や家屋、樹木といった環境要素ごとに空間線量率をシミュレートした結果、空間線量率は主に地面に由来することが確認された。これは、地面における放射性セシウムの挙動が場の空間線量率の主要な支配要因であることを意味する。地面における放射性セシウムの主な挙動は「物理減衰」「土壌における鉛直方向への移動」「舗装面における水平方向への流失」である¹⁸⁾。この内、人間活動は「物理減衰」以外に寄与するが、居住区域における土壌中の放射性セシウムは、除染の影響により埋没して分布するため、空間線量率の減衰には「舗装面における水平方向への流失」が大きく寄与すると考えられる。そのため今後、本研究で確認された帰還困難区域と避難指示解除区域で異なる¹³⁷Cs沈着量の減少速度をシミュレーションに反映することで、人間活動に由来する空間線量率の減衰を評価することが可能と考えられる。

クレンジングした空間線量率の時系列データについて環境半減期を求めたところ、多くの地点で早い環境半減期（1年未満）と遅い環境半減期（5–10年）の二つで減衰が表された。また地点毎の減少は、早い環境半減期によって特徴づけられていた。環境半減期から求めた平均減少速度について社会環境データとして土地利用区分や流動人口データとの相関分析を実施した結果、人間活動の高い都市域で減少が早く、森林や水域で減少が遅いこと、流動人口数と正の相関があることが確認され、モニタリングを実施した試験サイトのみならず福島県全域を対象とした広域でも人間活動が空間線量率の低減に寄与することが示された。一方、流動人口データと減少速度の間の相関性は弱く、今後、社会環境データで減少速度をより定量的に表すには、相関分析条件を精査し、継続して解析する必要がある。

V 結論

本研究により、人間活動のある居住区域で、人間活動が限定的な帰還困難区域よりも速やかな¹³⁷Cs沈着量と空間線量率の減少が確認されたことから、人間活動が放射性セシウムのウェザリング効果に寄与し、空間線量率の低減を促進している可能性が示された。3D-ADRESによる空間線量率のシミュレーションは、良好にモデルサイトにおける空間線量率の空間的な変動を再現できた一方で、推定値自体は24%ほど過小評価していたため、人間活動を反映したシミュレーション解析に先んじ線源の設定方法を改善する必要性が認められた。従来行われてきた大量のモニタリ

ングデータについてクレンジング処理し、減少傾向を評価した結果、減少傾向は早い環境半減期と遅い環境半減期の2成分で表されること、地点毎の減少傾向の違いは早い環境半減期で特徴づけられることが確認された。得られた環境半減期について、人間活動を表す社会環境データ（土地利用区分、流動人口データ）との相関分析を行った結果、人間活動が福島県全域を対象とした広域でも、空間線量率の低減に寄与していることが示された。

VI 次年度以降の計画

次年度は現地でのモニタリング調査を継続することにより、本年度評価した避難指示区分や交通量に対応する空間線量率・¹³⁷Cs沈着量の減少速度を更新すると共に、空間線量率と¹³⁷Cs沈着量との関係性を評価する。3D-ADRESについては本年度、モデルサイトの空間線量率の空間的な変動を良好にシミュレートできた一方、やや過小評価する傾向にあったことから、線源の設定方法を改良する。その後、モニタリング調査にて得た減少速度を3D-ADRESのパラメータとし、モデルサイトでの空間線量率の経時変化についてシミュレートすることで、避難指示区分や交通量の影響を評価する。モニタリングデータベースを用いた解析では、これまでに解析に必要なデータセットを整備し終えており、次年度に空間線量率の減少傾向と人間活動を表す社会環境データとの関係解析を行う。具体的には、減少モデルにおける各成分の減少速度について、人間活動を特徴づける流動人口、土地利用といった社会環境データを変数として主成分分析、及び相関解析を行い、空間線量率の減少に影響する社会環境データを評価する。

この研究に関する現在までの研究状況、業績

- 1) Yoshimura K. Air dose rates and cesium-137 in urban areas—deposition, migration, and time dependencies after nuclear power plant accidents, *J Nucl Sci Technol.* 2022; 59: 25–33.
- 2) Yoshimura K Nakama S Fujiwara K. Radiation Monitoring in the Residential Environment: Time Dependencies of Air Dose Rate and ¹³⁷Cs Inventory, *J Radiat Pro Res.* 2022; DOI: 10.14407/jrpr.2021.00199.
- 3) 金敏植, Alex Malins, 町田昌彦, 他. 環境中での空間線量率 3次元分布計算システム (3D-ADRES) の研究開発の現状と今後の展望 —福島復興に向けた市街地・森林等の環境中空間線量率分布の推定—. *RIST NEWS.* 2021; 67: 3-15.

引用文献

- 1) Kinase S Takahashi T Sato S et al. Development of prediction models for radioactive caesium distribution within the 80-km radius of the Fukushima Daiichi nuclear power plant, *Radiat Prot Dosimetry.* 2014; 160: 318–321.
- 2) Saito K Mikami S Andoh M et al. Temporal Change in Radiological Environments on Temporal Change in Radiological Environments in Fukushima, *J Radiat Prot Res.* 2019; 44: 128–148.
- 3) Andoh M Mikami S Tsuda S et al. Decreasing trend of ambient dose equivalent rates over a wide area in eastern Japan until 2016 evaluated by car-borne surveys using KURAMA systems, *J Environ Radioact.* 2018; 192: 385–398.
- 4) Golikov V Balonov M Erkin V et al. Model validation for external doses due to environmental

- contaminations by the Chernobyl accident, *Health Phys.* 1999; 77: 654–661.
- 5) Golikov V Balonov M Jacob P. External exposure of the population living in areas of Russia contaminated due to the Chernobyl accident, *Radiat Environ Biophys.* 2002; 41: 185–193.
 - 6) Saito K Jacob P. Gamma Ray Fields in the Air Due to Sources in the Ground, *Radiat Prot Dosimetry.* 1995; 58: 29–45.
 - 7) Nakama S Yoshimura K Fujiwara K et al. Temporal decrease in air dose rate in the sub-urban area affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident during four years after decontamination works, *J Environ Radioact.* 2019; 208–209: 106013.
 - 8) Yoshimura K Saegusa J Sanada Y. Initial decrease in the ambient dose equivalent rate after the Fukushima accident and its difference from Chernobyl, *Sci Rep.* 2020; 10: 1–9.
 - 9) WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, 2012.
 - 10) UNSCEAR. Annex, A. Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami in UNSCEAR 2013 Report: Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, 2013.
 - 11) Andersson KG Roed J Fogh CL. Weathering of radiocaesium contamination on urban streets, walls and roofs, *J Environ Radioact.* 2002; 62: 49–60.
 - 12) Andoh M Nakahara Y Tsuda S et al. Measurement of air dose rates over a wide area around the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant through a series of car-borne surveys, *J Environ Radioact.* 2015; 139: 266–280.
 - 13) Yoshimura K Saito K Fujiwara K. Distribution of ¹³⁷Cs on components in urban area four years after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident, *J Environ Radioact.* 2017; 178–179: 48–54.
 - 14) Kim M Malins A Yoshimura K et al. Simulation study of the effects of buildings, trees and paved surfaces on ambient dose equivalent rates outdoors at three suburban sites near Fukushima Dai-ichi, *J Environ Radioact.* 2019; 210: 105803.
 - 15) Ester M Kriegel H-P Sander J et al. A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise, *Proc 2nd Int Conf Knowl Discov Data Min.* 1996; 226–231.
 - 16) Andoh M Matsuda N Saito K. Evaluation of ambient dose equivalent rates owing to natural radioactive nuclides in Eastern Japan by car-borne surveys using KURAMA-II, *Trans At Energy Soc Japan.* 2017; 16: 63–80.
 - 17) Ministry of Education Culture Sports Science and Technology. Results of the Fourth Airborne Monitoring Survey by MEXT, 2011;
 - 18) Yoshimura K. Air dose rates and cesium-137 in urban areas—deposition, migration, and time dependencies after nuclear power plant accidents, *J Nucl Sci Technol.* 2022; 59: 25–33.

The anthropogenic impacts on temporal decrease in air dose rate in urban areas

Kazuya Yoshimura¹

1 Sector of Fukushima Research and Development, Japan Atomic Energy Agency, Fukushima, Japan

Keywords: air dose rate; cesium-137 activity per unit area; urban area; anthropogenic impacts

Abstract

This study aims to quantitatively evaluate the effects of human activities on the decreasing trend of air dose rates in urban areas, using both an experimental approach that combines observations and simulation analysis, and a statistical approach that analyzes the relationship between the monitoring database accumulated to date and socio-environmental data as an indicator of human activities. We measured air dose rates by back-pack surveys, which carrying detector on operator's back during the survey by walk, inventory of ¹³⁷Cs deposition by portable germanium detectors, and traffic volume surveys in the urban areas of Okuma and Tomioka towns. The relationship between decreasing rates of air dose rates and ¹³⁷Cs deposition and the evacuation zone or traffic volume were analyzed. It was shown that air dose rate decreased faster in the specified restoration/rehabilitation sites due to the effect of decontamination. Decrease rate of the ¹³⁷Cs inventory may be facilitated by higher traffic volume. An environmental model that reproduced houses, trees, and ground surfaces was developed, and it was confirmed that the air dose rate at the model site could be well represented by our model. In the statistical approach, we continued the cleansing of monitoring data using machine learning, and analyzed the decreasing trend of the time-series data. As a result, it was confirmed that the decay of air dose rates can be expressed in terms of slow and fast environmental half-lives, and that the decay trend for each location is characterized by an early environmental half-life. To analyze the relationship between the obtained environmental half-lives and human activities, correlation analysis with land use classification and current population data as socio-environmental data was conducted, indicating that human activities contribute to the reduction of air dose rates even in the wide area of Fukushima Prefecture.