

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

吉村和也（日本原子力研究開発機構・研究主幹）

研究要旨

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、人為的な影響を定量的に評価することを目的とする。本研究では、モデルサイトにおける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に加え、これまでに蓄積されてきたモニタリングデータベースと、人間活動の指標となる社会環境データの関係を解析する統計的アプローチを用いる。令和 2 年度は、試験的アプローチとして大熊町、富岡町の市街地である 4 つの試験サイトを対象に、歩行サーベイによる空間線量率分布の評価、可搬型ゲルマニウム検出器による Cs-137 沈着量の測定、交通量調査を実施した。併せて当該地域における過去のモニタリングデータを整備し、空間線量率、Cs-137 沈着量の経時変化を解析した。その結果、空間線量率の減少は除染が無くても市街地で農用地より約 17%早いことが確認された。また Cs-137 沈着量は、舗装面で水平方向への流失により経時的に減少する一方、土壌面で明確な減少が確認されなかった。以上の結果から、市街地における空間線量率の速やかな減少は、放射性セシウムの舗装面における水平方向への流失が寄与していることが示唆された。またシミュレーション解析により、被覆面で異なる放射性セシウムの動態が、市街地における空間線量率の減少に及ぼす影響を評価するため、本年度はシミュレーションに必要な地理空間情報データ（数値標高データ、数値表層データ、土地利用データ、建物データ、樹木データ）と、市街地を再現するためのプログラムを整備した。統計的アプローチでは、時・空間的な解像度と網羅性の高さから、規制庁により公開されている走行サーベイ結果を解析に使い、データのクレンジング（欠測値の補完、外れ値の除去）を行った。また社会環境データを調査し、その一部（土地被覆・植生データ、夜間灯火量、エアロゾル）を取得した。

キーワード： 空間線量率、¹³⁷Cs 沈着量、経時変化、市街地、人間活動

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）

金敏植（日本原子力研究開発機構・研究員）

Alex Malins（日本原子力研究開発機構・研究員）

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）

阿部智久（日本原子力研究開発機構・技術員）

中間茂雄（日本原子力研究開発機構・技術副主幹）

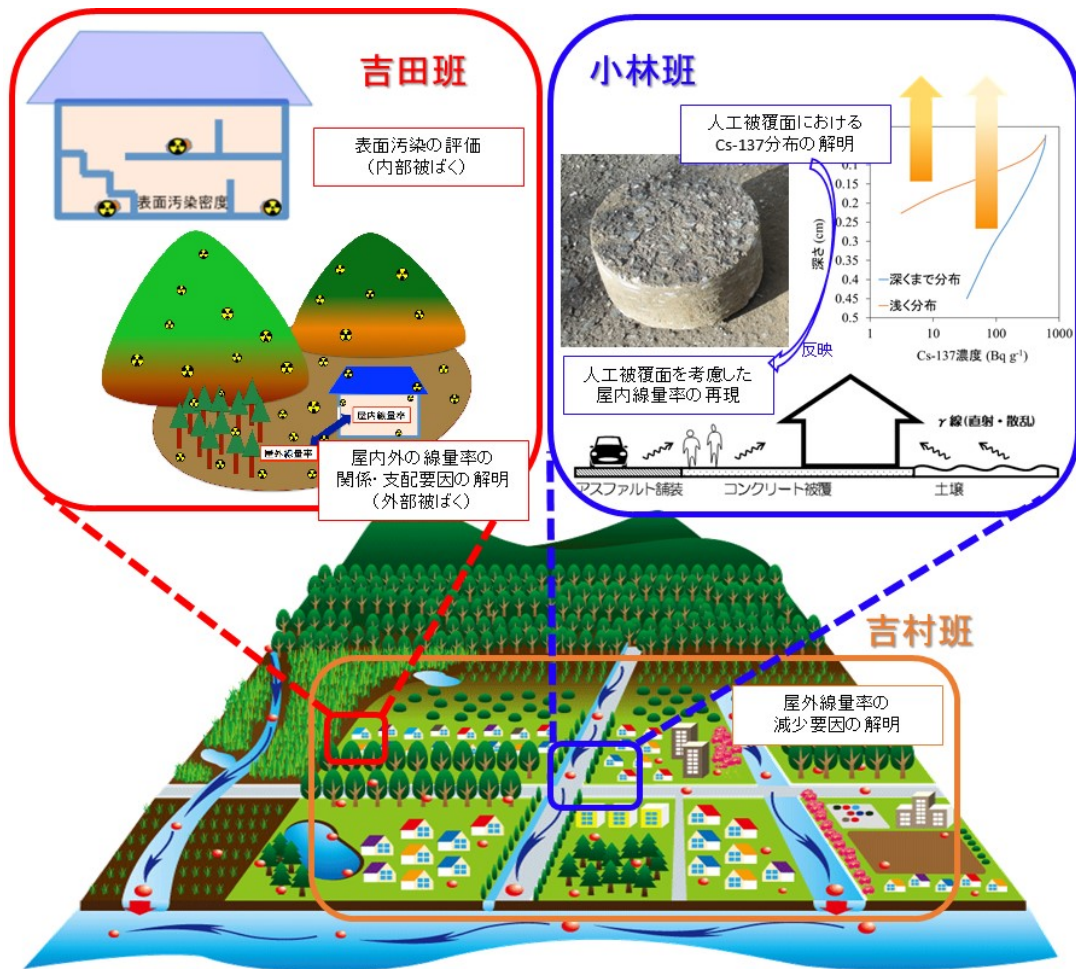
I. 研究目的

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おいて必要な情報である。特に住民が大半の時間を過ごす市街環境における減少傾向とその支配要因は、上述の放射線防護、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、現地観測調査とシミュレーション解析、モニタリングデータベースを活用した解析により、空間線量率の経時的な減少に対する除染や交通量といった人間活動の影響を定量的に評価することを目的とする。さらに、線源となる Cs-137 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で空間線量率や Cs-137 沈着量などをモニタリングするとともに、当該地域の過年度データを整理し、経時変化を把握することを目的とした。併せて、統計的アプローチとして人間活動の影響についてより広域で評価し、その普遍性を確認するための、モニタリングデータベースを用いた解析環境を整備することを目的とした。

なお、「令和 2 年度放射線の健康影響に係る研究調査事業」では、市街地の空間線量率に係る研究課題が、本研究に加え東北大学の吉田浩子准教授、小林光准教授により計 3 件実施されている（以下、吉村班、吉田班、小林班）。各研究課題の位置づけと実施内容の一覧を次ページに示す。本研究のターゲットは、市街地全域における屋外の空間線量率であり、その減少傾向と要因につき現地調査、シミュレーション解析、統計解析を用いて評価するものである。一方、吉田班、小林班は、屋内線量率をターゲットとしており、それぞれ屋内線量率に対する家屋周辺環境、および人工被覆面（アスファルトやコンクリートなど）の影響を、現地調査とシミュレーション解析を併せて評価するものである。このように、各研究課題は類似のシミュレーション解析を用いるが、そのターゲットとスケールは異なるものである。しかしながらそれぞれの成果を併せることにより、家屋から地域に至る様々なスケールで、屋内外の空間線量率の理解に有用な情報が得られることが期待される。



	吉田班	小林班	吉村班
ターゲット	屋内線量率	Cs分布 屋内線量率	屋外線量率
スケール	家屋内とその周辺環境	家屋内とその周辺環境	市街地全域
実施項目	家屋内と家屋周辺の放射線調査 (低減係数、汚染密度の経時変化の評価)	人工被覆面におけるCs分布調査 (Csの深度分布と下方浸透の評価)	地域の屋外線量率、Cs沈着量の調査 (経時変化の評価)
	低減係数に影響する要因の解析 (除染、経過時間など)	境界モデルによる屋内放射線の再現	各種事業の線量率データを用いた線量率減少要因の解析
	スペクトル測定・シミュレーション*による屋内放射線の支配要因の評価	スペクトル測定・シミュレーション*によるCs深度分布の推定手法の検討	スペクトル測定・シミュレーション*による屋外線量率の低減要因の評価

※ シミュレーションは、ツールとしていずれも PHITS、ないしは PHITS を応用した 3D-ADRES を用いて実施

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 Cs-137 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

調査地を図 1 に示す。空間線量率、および Cs-137 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ことが予想される帰還困難区域、特定復興再生拠点、避難指示解除区域に該当するエリアを試験サイトとして実施した。

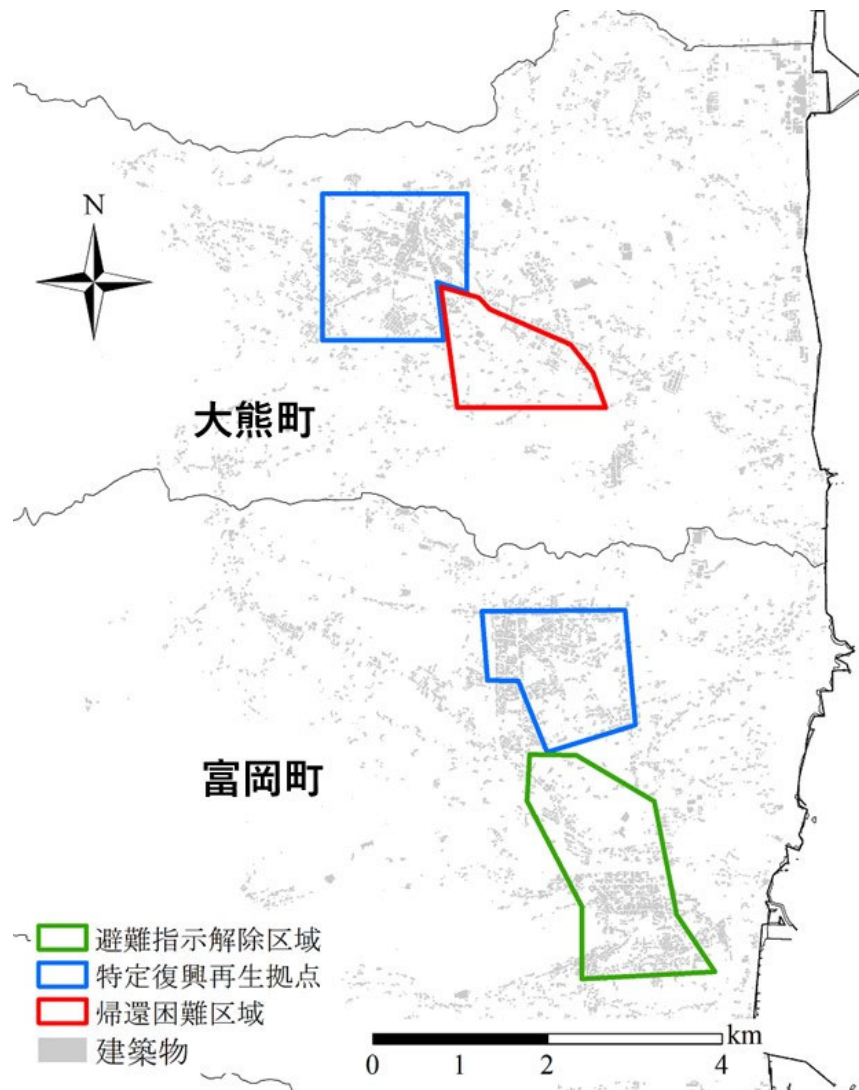


図 1 調査地

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 1 月 20 日から 26 日にかけて測定した。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。測定と併せ、空間線量率の減少傾向を評価するため、当該地域にて過年度に他事業等で取得されているデータについても整備した。測定、ないしは整備したデータは、経時変化の評価を可能とするため、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として解析に用いた。

Cs-137 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 16 地点で測定した。測定は令和 2 年 9 月 9 日～10 日、および令和 3 年 1 月 18 日～19 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、Cs-137 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⁾。また Cs-137 沈着量の減少傾向を評価するため、過年度に他事業等で取得された舗装面における Cs-137 沈着量を整備した。

表 1 Cs-137 沈着量測定地点

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	避難指示解除区域	道路	37.4037	140.9819
6	大熊町	避難指示解除区域	道路	37.4047	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	避難指示解除区域	道路	37.4054	140.9745
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	避難指示解除区域	道路	37.3716	141.0072
13	富岡町	避難指示解除区域	道路	37.3705	140.9669
14	大熊町	避難指示解除区域	道路	37.4125	140.9907
15	大熊町	避難指示解除区域	道路	37.4103	140.9773
16	大熊町	帰還困難区域	駐車場	37.4124	140.9910

本研究では人間活動の一つとして、自動車などの交通に伴う路面の摩耗に着目し、交通量調査を実施した。実際の交通量の多寡を考慮し、交通量は表 1 のサイト No. 3、6、8、13-15 の計 6

地点において、令和 2 年 12 月 16 日、ないしは 22 日に 24 時間録画した動画を用い集計した。集計の際には、四輪車のみを対象とし、昼間（7～19 時）と夜間（19 時～翌 7 時）を区別した。

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-ADRES）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、Particle and Heavy Ion Transport code System（PHITS）に入力して行った。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。

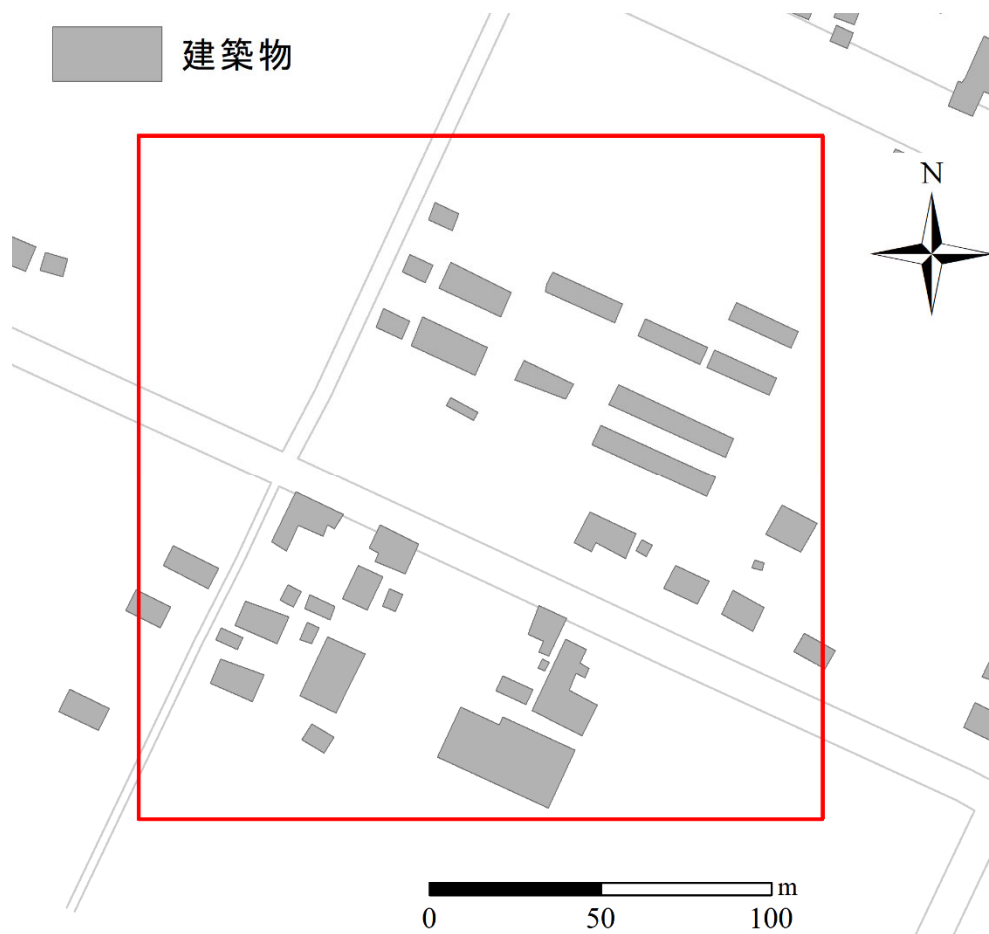


図 2 シミュレーション解析の対象となるモデルサイト（赤色枠内）。200 m 四方圏内を対象エリアとした。

本年度は、シミュレーションの校正、検証に必要となる空間線量率分布、Cs-137 沈着量を測定した。モデルサイト内の空間線量率分布は、 γ プロッターFを用いた歩行サーベイにより、令和 3 年 1 月 20 日に測定した。 γ プロッターFは、2つのプラスチックシンチレータとGPSを備えており、5 cm、および 1 m 高の空間線量率と座標を、3 秒間隔で連続的に取得することが可能である。

Cs-137 沈着量は舗装面 6 点、土壌面 6 点の計 12 点で、前述のよう可搬型ゲルマニウム半導体検出器を用い、令和 3 年 1 月 19–20 日に測定した。なお、ISOCS 解析に用いたパラメータである緩衝深度と測定対象の密度は、舗装面では前述の値とし、土壌面ではそれぞれ 4.12 g cm^{-2} 、 1.6 g m^{-3} とした。

シミュレーション解析に用いるデータ取得の他、本年度は 3D-ADRES を用いた解析環境を整備した。3D-ADRES は、シミュレーション対象区域内のコンポーネント（家屋や道路、土壌面、樹木など）を再現した環境モデルを必要とする。この環境モデルは、対象区域内を格子で区切り、各格子にコンポーネントを割り当てることで作成されるが、格子の作成方法によりモデル精度は影響を受けると同時に、手作業での作成は作業時間と環境モデルの再現性に課題が残る。本年度は、対象区域を自動で最適な細分化格子に区分する機能、および作成された各格子から飛来する γ 線直達線を計算する機能を構築した。併せて、環境モデルの作成に必要な地理空間情報を収集した。

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を用い、空間線量率の減少傾向を評価することとした。

本年度は、走行サーベイデータを収集、分析した後、データのクレンジング（欠測値の補完、外れ値の削除）を行った。走行サーベイデータは、「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/>)」にて平成 23 年度から 28 年度の間取得されたデータを収集した。

走行サーベイは、調査回により測定経路が異なるため、モニタリングデータには調査期間を通じて欠測となるメッシュが存在する。そこで以降の解析では、全 13 回の調査の内、12 回以上で測定されているメッシュデータを対象とした。このデータセットについて欠測値を補完するため、機械学習のアルゴリズムであるランダムフォレスト¹⁴⁾を用い、欠測地点と他観測地点の量的関係を他の欠測のない調査回から学習することで欠測値を推定した。またデータセットには、工事といった周辺環境の変化などの外部要因のため、空間線量率が急激な増減を示す外れ値が含まれる。空間線量率の経時的な減少を評価するため、本研究ではこのような外れ値を Density-based の DBSCAN¹⁵⁾により抽出し、データセットから除いた。またモニタリングデータの整備と併せ、一部の社会環境データを収集した。

（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

本年度に各試験サイトで取得された空間線量率の分布マップを図 3 に示す。空間線量率は、同試験サイトの中でも不均一な分布を示し、全体的な傾向として大熊町では北部ほど高く、南部で低い傾向に、富岡町では東部で高く、西部で低い傾向にあった。これは 1F から西方、および南方に延びるプルームがそれぞれ大熊町の北部と富岡町の東部にかかっているためである¹⁶⁾。

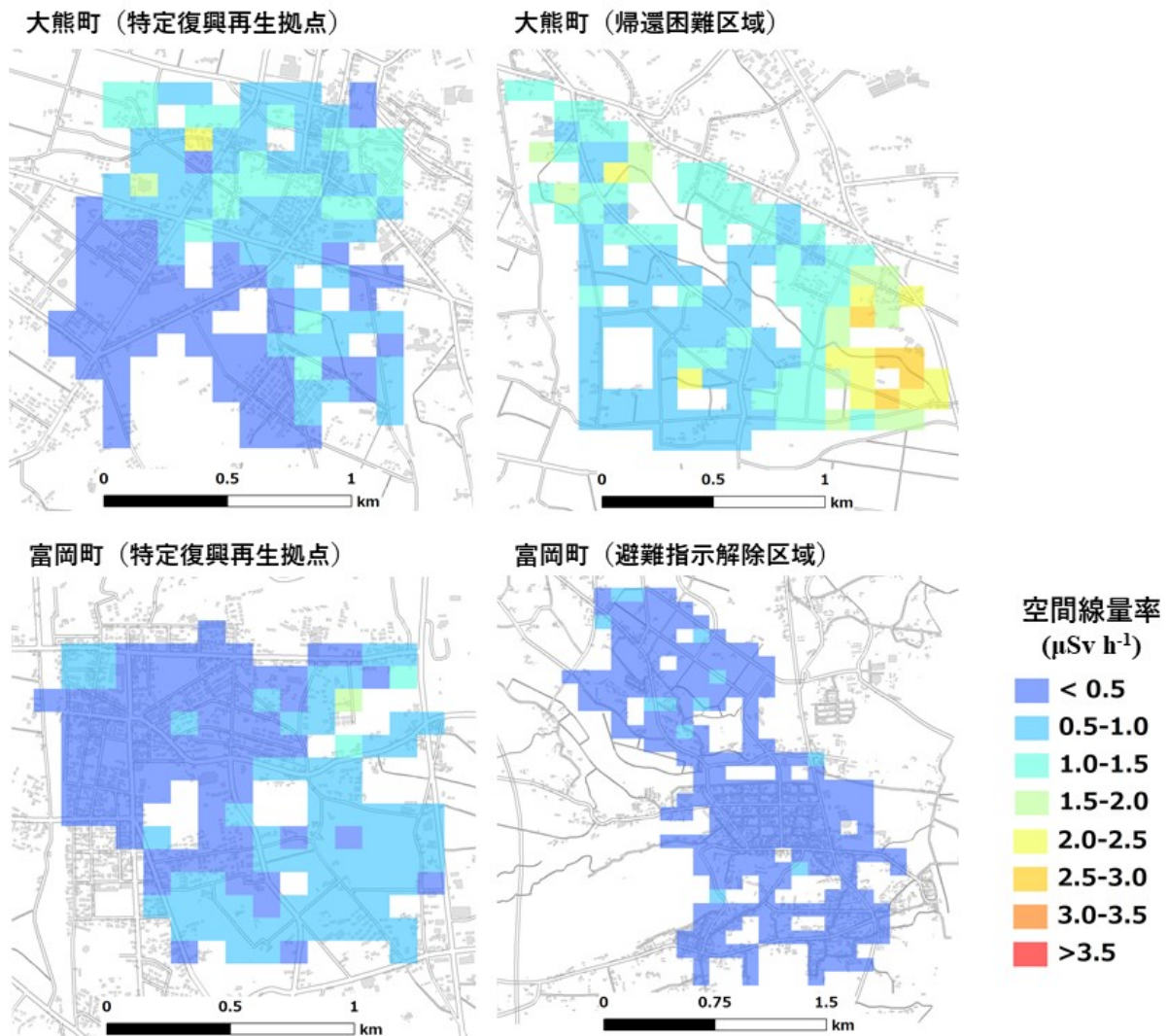


図 3 各試験サイトで得られた空間線量率分布マップ

各試験サイトにおける空間線量率の平均値、最大値、最小値を表 2 に示す。最も空間線量率の高いエリアは大熊町の帰還困難区域であった。また富岡町の避難指示解除区域で最も低い値となった。富岡町における自然放射線に由来するバックグラウンド線量率は $0.036\text{-}0.059$ であり^{17,18)}、これは本研究で得た平均空間線量率の約 $12\sim 20\%$ に相当する。以上の結果は、人工核種（特に放射性セシウム）に由来する空間線量率の減少速度を評価する際には、特に低線量地域でバックグ

ラウンド線量率を考慮する必要があることを示す。

表 2 各試験サイトで歩行サーベイにより得られた空間線量率 ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)

自治体	試験サイト	平均値	最大値	最小値
大熊町	帰還困難区域	1.27	2.98	0.54
大熊町	特定復興再生拠点	0.64	2.29	0.14
富岡町	特定復興再生拠点	0.53	1.56	0.17
富岡町	避難指示解除区域	0.30	0.98	0.11

空間線量率分布マップの時系列として、大熊町（特定復興再生拠点）で得られた結果を図 4 に示す。空間線量率は全体として時間と共に減少しており、平均空間線量率は 2014 年 12 月時点の $3.8 \mu\text{Sv h}^{-1}$ から 2021 年 1 月時点の $0.64 \mu\text{Sv h}^{-1}$ まで減少していた。特に破線で囲われた除染エリアでは空間線量率が顕著に減少した。

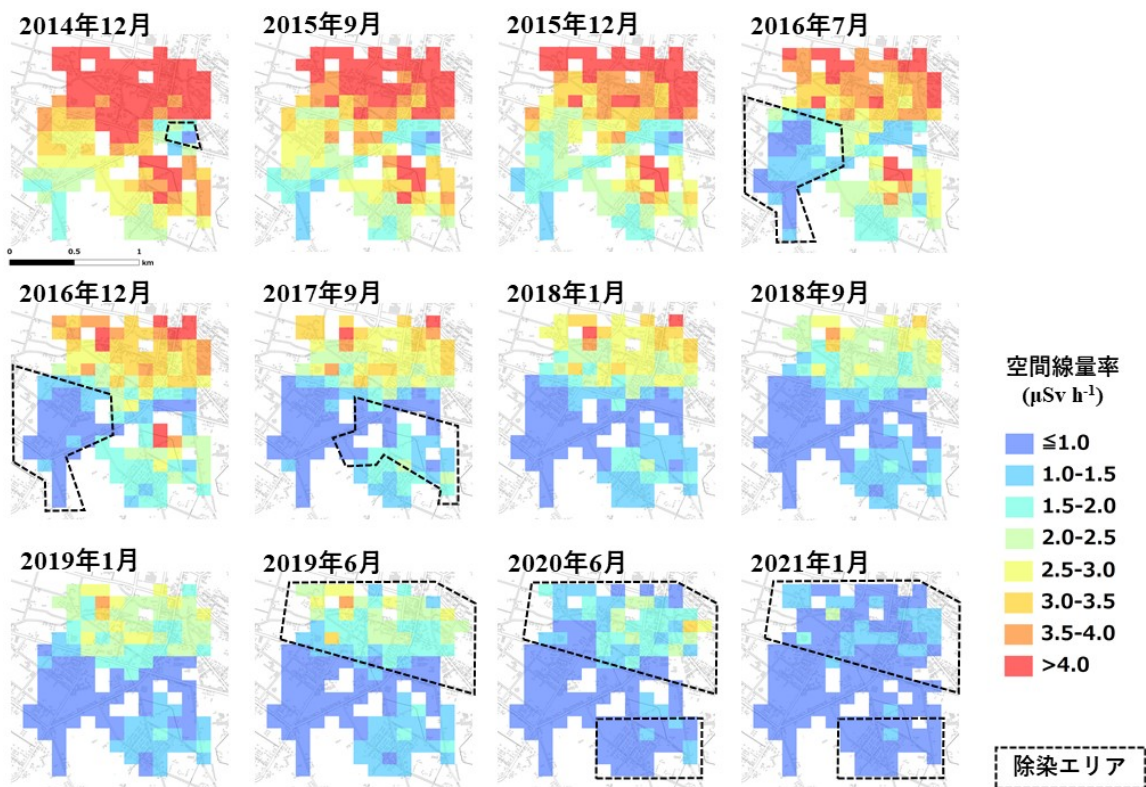


図 4 空間線量率分布マップの経時変化（大熊町特定復興再生拠点サイト）

空間線量率の減少には、除染の他に土地利用が影響することが報告されており、一般的に市街地で他の土地利用よりも減少が早い傾向にある¹⁻³⁾。空間線量率の減少傾向に対する土地利用、および除染の影響を評価するため、除染の実施個所と実施時期が明らかな大熊町（特定復興再生拠点）、および富岡町（特定復興再生拠点）における 2014-2018 年のデータを対象に、空間線量率

の経時変化を解析した。空間線量率の減少傾向を、初回の調査時に得られた値を 1 とした相対値として図 5 に示す。なお、解析に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 $0.059 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ¹⁸⁾を差し引いた空間線量率を用いた。空間線量率は、市街地、農用地共に除染がなくても放射性セシウムの物理減衰による低減より速やかに減少した。減少速度は、市街地、農用地それぞれで 0.235 year^{-1} 、 0.201 year^{-1} であり、市街地で約 17% 早く減少した。また除染を行った市街地、農用地の空間線量率は、2018 年 9 月時点でそれぞれ未除染地域の 57%、46% の値を示した。市街地における農用地よりも高い除染効果は、従来の報告と符合した¹⁹⁾。

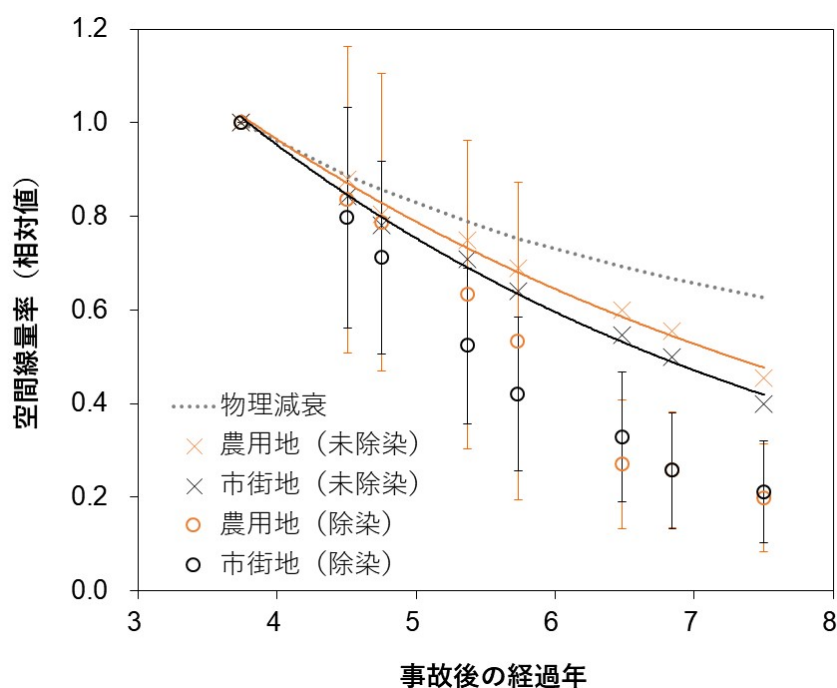


図 5 大熊町、および富岡町の特定復興再生拠点サイトで取得した土地利用別、除染／未除染地域の空間線量率経時変化。第一回調査時（2014 年 12 月）の測定値を 1 とした相対値を示す。物理減衰に従う空間線量率の減少（破線）は、Cs-134, -137 の壊変と、緩衝深度を 1.0 g cm^{-2} と仮定した沈着量－空間線量率換算係数 ($\mu\text{Sv h}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ m}^2$)²⁰⁾を用いて求めた。

②Cs-137 沈着量

舗装面における Cs-137 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 Cs-137 沈着量を初期沈着量（第 4 次航空機モニタリングで得られた 2011 年 11 月 5 日時点の値）で基準化し、相対沈着量として解析を行った。過年度データも併せた相対 Cs-137 沈着量の経時変化を図 6 に示す。Cs-137 沈着量は、除染の前後にかかわらず時間の経過と共に減少した。減少速度はそれぞれ -0.183 year^{-1} （信頼区間は $-0.278 \sim -0.129 \text{ year}^{-1}$ ）、 -0.204 year^{-1} （信頼区間は $-0.229 \sim -0.137 \text{ year}^{-1}$ ）であり、除染の前後でその減少速度に有意な差はなかった。

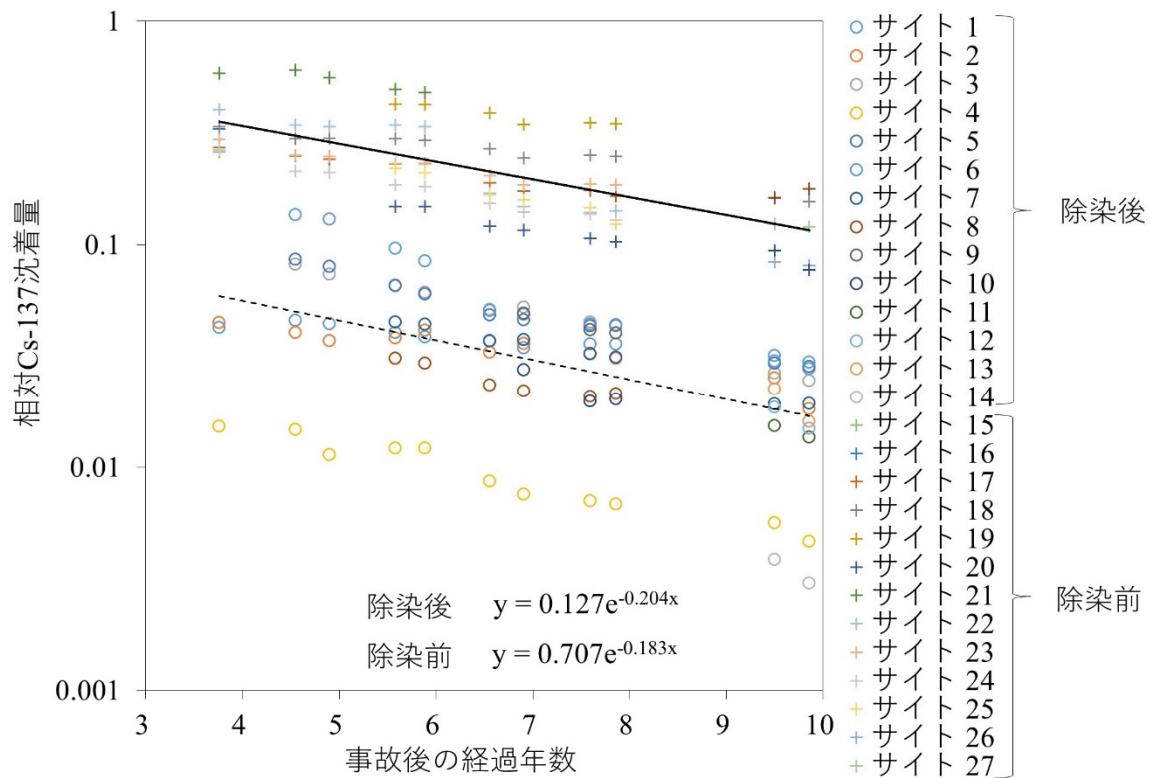


図 6 相対 Cs-137 沈着量の経時変化

③交通量調査

交通量調査の結果を表 3 に示す。交通量はいずれのサイトでも昼間に多く、夜間は減少したが、終日の交通量に占める夜間の交通量の割合は、4～28%と変動した。終日の交通量は 594～5,075 台の範囲で変動していた。

表 3 交通量調査結果

サイト No.	試験サイト区分	交通量		
		昼間	夜間	終日
3	特定復興再生拠点	2,258	106	2,364
6	避難指示解除区域	1,519	123	1,642
8	避難指示解除区域	546	48	594
13	避難指示解除区域	1,939	297	2,236
14	避難指示解除区域	4,334	741	5,075
15	避難指示解除区域	1,180	460	1,640

2) シミュレーション解析

① 校正、検証に用いる空間線量率、放射性セシウム沈着量

モデルサイトで得られた地上 1m 高、および 5cm 高の空間線量率分布を図 7 に示す。モデルサイトにおける空間線量率（1 m）は、1～3 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ の範囲にあった。また全体として 5 cm 高の空

間線量率が高い傾向にあった。

モデルサイトで得られた Cs-134、-137 沈着量を表 4 に示す。沈着量は土壌面で 773–1,789 kBq m⁻²、舗装面で 172–248 kBq m⁻²であった。

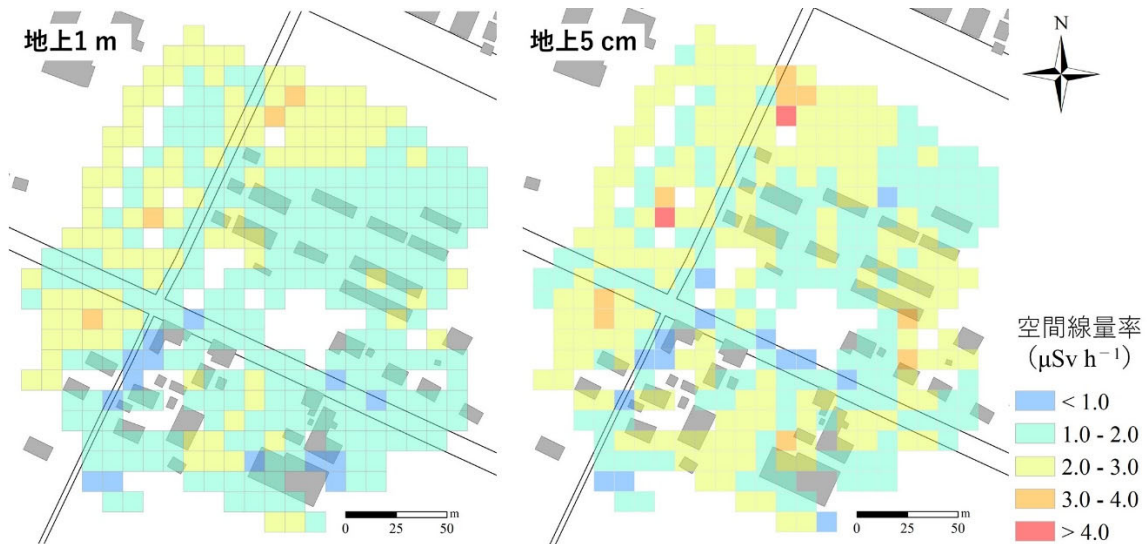


図 7 シミュレーション解析のモデルサイトにおける空間線量率分布

表 4 モデルサイトで得た Cs-134、-137 沈着量

サイト	Cs-134 (kBq m ⁻²)	Cs-137 (kBq m ⁻²)
土壌面-1	76	1,623
土壌面-2	35	773
土壌面-3	83	1,789
土壌面-4	62	1,327
土壌面-5	67	1,446
土壌面-6	61	1,300
舗装面-1	11	226
舗装面-2	9.0	191
舗装面-3	11	248
舗装面-4	8.4	172
舗装面-5	9.2	203
舗装面-6	11	248

②3D-ADRES 解析環境の整備

本年度は 3D-ADRES で用いる環境モデル作成の精度向上、効率化を目的に、対象区域を自動で最適な細分化格子に区分する機能を整備した。格子作成前後の画像を図 8 に示す。本機能では、中心座標と距離の設定、距離ごとの格子サイズの指定を可能とした。図 8 の左の図は、本機能に

より任意の座標で中心座標を設定し、そこから半径 50m、100m、150m、200m の領域に円を描画した様子を、右の図は描写した円で区切られた範囲ごとに指定されたサイズで地形格子を生成した様子を示している。また本機能には、より再現性の高い環境モデルを作成するには、局所的に解像度の高い格子を作成する必要があるため、これに対応した格子サイズの編集機能も付加した。



図 8 最適細分化格子の自動作成機能画像（左：格子作成前、右：格子作成後）

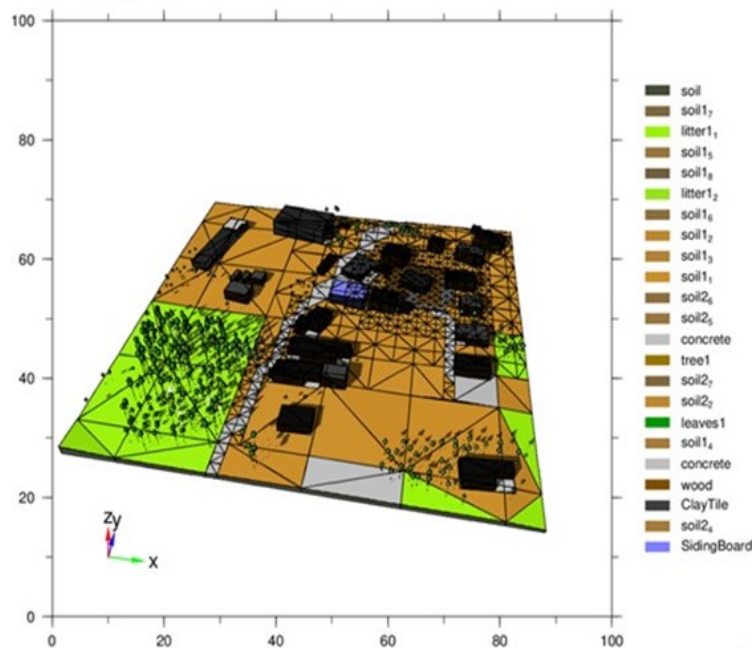
本機能を用いた試算のため、任意の領域で細分化格子を作成後、環境モデルを作成し空間線量率の計算を行った。計算に用いた領域、および当該領域における建物や樹木などを再現した環境モデル、線源設定状況、そしてこれらの情報を元に計算された空間線量率の計算結果を図 9 に示す。試算では、半径 20m を 3m 格子、半径 40m を 5m 格子、半径 60m を 10m 格子、半径 80m を 20m 格子、半径 80m 以降を 40m 格子で作成した。環境モデルは、作成した格子に各コンポーネントとその高さ情報を設定して作成した。この環境モデルに線源を付与することで、空間線量率が計算された。

3D-ADRES における環境モデルの作成には、図 10 に示される、空間地理情報（数値標高データ、数値表層データ、土地利用データ、建物データ、樹木データ）が必要となる。本年度はモデルサイトにおけるこれら空間地理情報についても整備した。以上の一連の作業により、シミュレーション解析環境が整った。

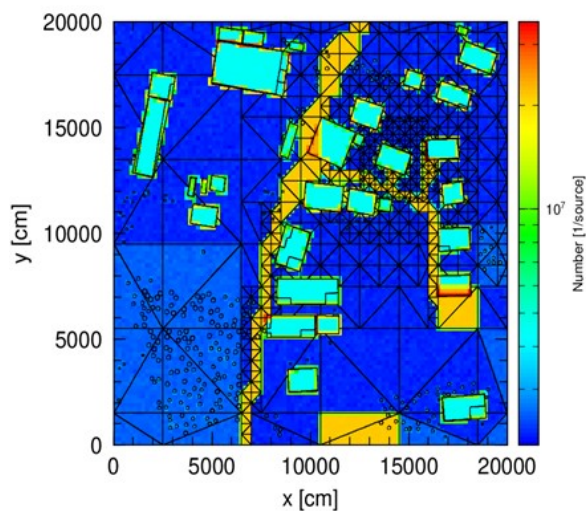
計算領域



環境モデル



線源の設定



空間線量率の計算結果

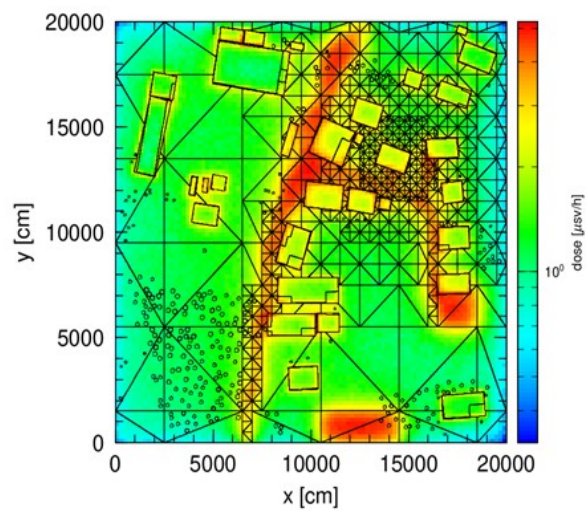


図 9 最適細分化格子の自動作成機能を用いた 3D-ADRES による試計算

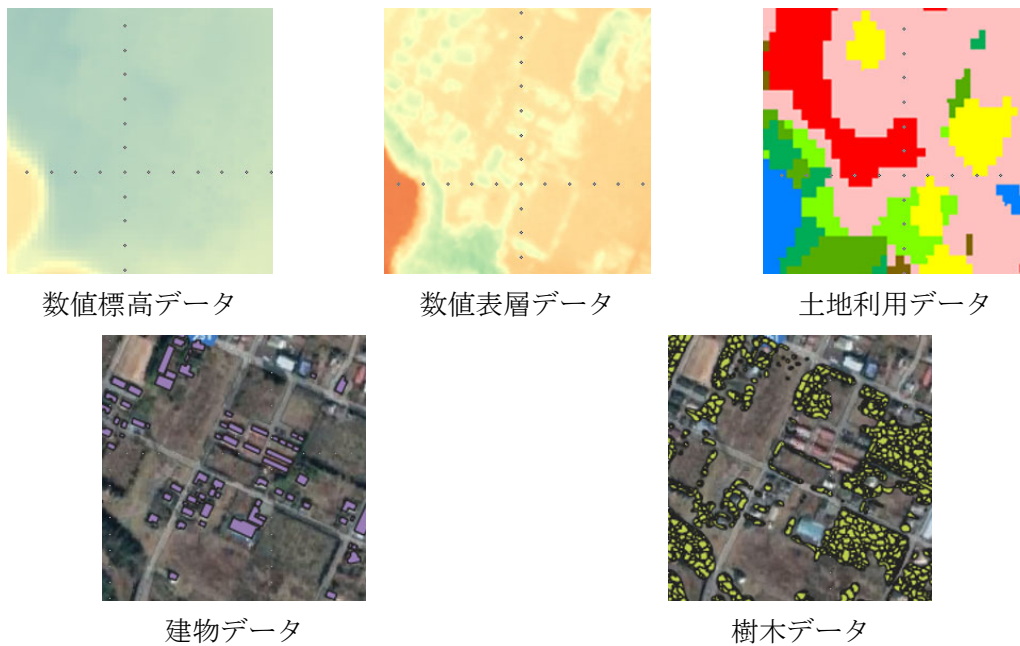


図 10 空間地理情報

3) データベースを用いた解析

①空間線量率データセットの整備

本研究では、文部科学省、原子力規制庁により平成 23 年度から 28 年度の間 13 回の調査で取得された走行サーベイ測定結果を用いた。表 5 に全調査回における測定期間、観測地点数を示す。

表 5 走行サーベイにおける各調査回の測定期間と測定メッシュ数

調査回	測定期間	測定期間中央値 (年)	測定メッシュ数
第 1 次	2011.06.06～2011.06.13	0.24	45,273
第 2 次	2011.12.05～2011.12.28	0.76	36,355
第 3 次	2012.03.13～2012.03.30	1.02	38,741
第 4 次	2012.08.20～2012.10.12	1.51	132,380
第 5 次	2012.11.05～2012.12.10	1.69	89,385
第 6 次	2013.06.12～2013.08.08	2.32	129,666
第 7 次	2013.11.05～2013.12.12	2.69	119,522
第 8 次	2014.06.23～2014.08.08	3.34	102,473
第 9 次	2014.11.04～2014.12.05	3.68	102,881
第 10 次	2015.06.29～2015.08.04	4.34	100,235
第 11 次	2015.11.02～2015.12.18	4.70	89,849
第 12 次	2016/06/27～2016/08/05	5.34	100,854
第 13 次	2016/10/31～2016/12/16	5.69	86,255

測定データは、100 m 四方のメッシュ内の平均値であり、全 13 回の調査では 210,421 メッシュ

で測定実績があった。全調査で得られたメッシュデータ総数は、1,173,896 であった。測定メッシュ数は調査回により大きく異なり、欠測データが多数含まれることが確認された。そのため本研究では、空間線量率の経時変化を評価するため、全 13 回の調査のうち 12 回以上で測定されているメッシュデータを対象に、以降のデータ処理を行うこととした。

解析対象のメッシュごとの空間線量率の経時変化を図 11 に示す。全体の傾向として事故後 2 年後以降のデータは比較的そろっているが、事故後初期に欠測データが多く存在した。この欠測データを補完するため、機械学習により欠測地点と他の測定地点における空間線量率の量的な関係を求め、全 13 回分のデータを補完した。図 12 に補完後の空間線量率の経時変化を示す。

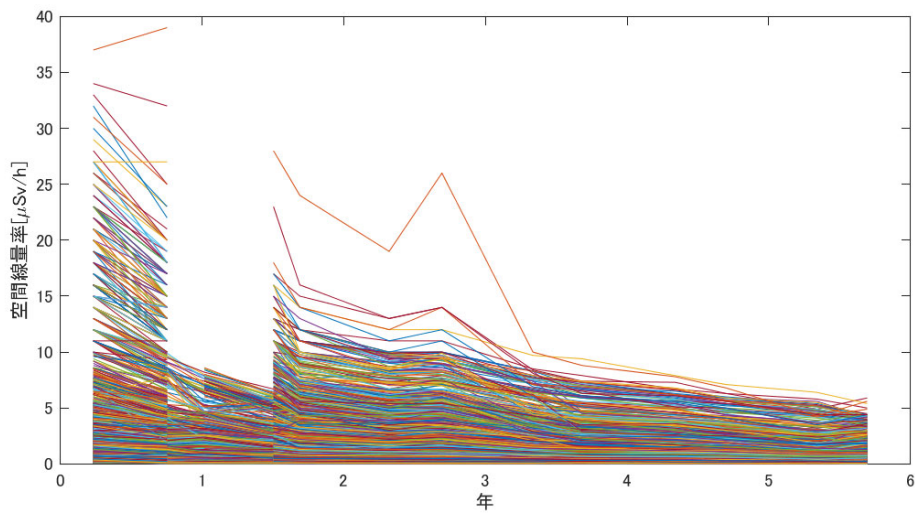


図 11 走行サーベイにより得られた測定メッシュごとの空間線量率経時変化

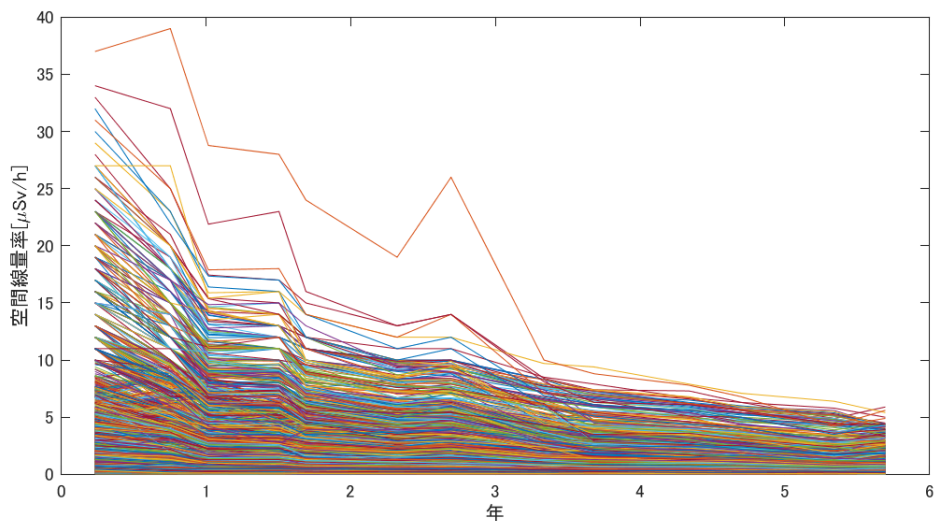


図 12 機械学習により走行サーベイデータ欠測値を補完した空間線量率の経時変化

欠測データを補完したデータセットには、工事といった周辺環境の変化などにより一般的な挙

動と異なる経時変化を示す外れ値が含まれる。このようなデータを DBSCAN により抽出した結果、外れ値は 579 メッシュに含まれていた。本研究では、残りの 21,810 メッシュのデータを今後の経時変化傾向の解析に用いることとした。

②社会環境データの整備

人間活動が反映される社会環境データとして、表 6 のデータを整備した。今後は、交通量調査データなど、他の社会環境データの有用性、入手方法などを検討するとともに、入手した社会環境データと空間線量率の減少速度の関係解析を行う。

表 6 入手した社会環境データ

社会環境データ	特徴	入手先
土地被覆、植生データ	<ul style="list-style-type: none"> 人工被覆と自然被覆の比較が可能 市街地の抽出が可能 	国土地理院
夜間灯火データ	<ul style="list-style-type: none"> エネルギー消費量として人間活動量を反映 年間平均であり、時間経過の評価が可能 	米国海洋大気庁
エアロゾル	<ul style="list-style-type: none"> 経済活動全般の活動量を反映 2018 年 7 月以降のデータのみ取得可能 	欧州宇宙機関

IV. 考察

空間線量率の減少要因は、主に線源となる核種の 1) 物理壊変、2) ウェザリング（水平／鉛直方向への移動）、3) 除染に伴う低減による。本研究における大熊町、および富岡町の試験サイトでの空間線量率モニタリング結果から、除染による低減効果は市街地で大きいことが確認され、従来の環境省による除染事業の結果と符合した¹⁹⁾。また、空間線量率は除染がなくても物理減衰より速やかに減少しており、その減少は市街地で農用地よりも早いことが確認された。これは、ウェザリングにより空間線量率の低減が促進されたこと、およびその低減効果が市街地で大きいことを示している。従来、空間線量率の減少は市街地において他の土地利用よりも速やかであることが、広域でのモニタリング結果から報告されているが¹⁻³⁾、本研究結果は、除染に加えてウェザリングも市街地における空間線量率の低減に他の土地利用よりも大きく寄与していることを示唆する。

ウェザリングによる空間線量率の低減は、線源となる放射性セシウムの土中の鉛直方向への移行（土壌による遮蔽効果の増加）と、水平方向への洗い流しにより生じる。市街地は主に公園などの平坦な土壌面と、道路や駐車場といった舗装面により覆われている。この平坦な土壌面における放射性セシウムの沈着量は物理減衰に従い減少し、水平方向への流失がほとんど認められない²¹⁾。一方、舗装面における放射性セシウムは鉛直方向に移動しない²²⁾代わりに、水平方向への洗い流し効果によりその沈着量が減少することが本研究により確認された。そのためウェザリングによる空間線量率の低減は、土壌面では主に放射性セシウムの土中への鉛直方向への移動による一方、舗装面では水平方向への洗い流しに由来することが示唆された。市街地で他の土地利用

よりも空間線量率の減少が早いことを考慮すると、市街地に固有の要素である舗装面における放射性セシウムの洗い流しが、空間線量率の低減促進に大きく寄与したと考えられる。

今後は現地調査に基づき、このウェザリングに対する人間活動の影響を評価するとともに、シミュレーション解析を併せることで、空間線量率の低減に対するウェザリングの影響を定量的に評価する予定である。併せて広域のモニタリングデータに対し、空間線量率の減少傾向と交通量や他の社会環境データとの関係解析を行うことで、人間活動の影響の普遍性と人間活動を表す有効な指標となる社会環境データを評価する予定である。

V. 結論

本研究により、除染やウェザリングによる空間線量率の低減効果は土地利用により異なり、市街地で他の土地利用よりも速やかに減少することが確認された。今後はこのウェザリング効果と人間活動の関係を評価することが重要である。また本年度は、空間線量率の低減要因を評価するための 3D-ADRES を用いたシミュレーション解析、ならびに空間線量率と人間活動量の関係を広域で評価するためのデータベースを用いた解析の環境を整備した。

VI. 次年度以降の計画

本年度は、現地観測、並びに過年度データを整備、解析することで、空間線量率の主な低減要因として、物理減衰、ウェザリング、除染の影響を評価した。次年度以降は、空間線量率の減少傾向を現地調査、データベースにより継続して評価するとともに、このウェザリングによる空間線量率の低減効果と人間活動の関係を評価する。具体的には以下について実施する。

現地調査に基づく評価

- ・ 空間線量率、Cs-137 沈着量の継続モニタリング
- ・ 空間線量率、Cs-137 沈着量の減少傾向と人間活動の関係解析（交通量、避難指示区分）
- ・ 観測データを入力パラメータとした 3D-ADRES による空間線量率低減傾向の再現
- ・ 3D-ADRES による空間線量率減少要因の定量的評価

データベースを用いた解析

- ・ データベースを用いた空間線量率減少傾向の評価
- ・ 人間活動の指標となる社会環境データの調査
- ・ 空間線量率の減少傾向と、社会環境データの関係解析

VII. この研究に関する現在までの研究状況、業績

ア) 論文・雑誌等

なし

イ) 学会発表等

- 1) Yoshimura K. Environmental Radiation Monitoring in Fukushima ii) Urban environment, The 15th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA) (January 18-22, 2021).

ウ) 書籍・総説

なし

エ) 受賞

なし

オ) 特許

なし

カ) 環境行政への活用・貢献実績

なし

VIII. 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) 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.
- 3) 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.
- 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 ^{137}Cs 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) Breiman L. Random Forests. *Mach Learn.* 2001; 45: 5–32.
 - 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) Sanada Y Torii T. Aerial radiation monitoring around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant using an unmanned helicopter. *J Environ Radioact.* 2015; 139: 294–299.
 - 17) Sanada Y Yoshimura K Urabe Y et al. Distribution map of natural gamma-ray dose rates for studies of the additional exposure dose after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. *J Environ Radioact.* 2020; 223–224: 106397.
 - 18) 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.
 - 19) Ministry of the Environment. Decontamination Projects for Radioactive Contamination Discharged by Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. 2018.
http://josen.env.go.jp/en/policy_document/pdf/decontamination_report1807_01.pdf
 - 20) Saito K Petoussi-Henss N. Ambient dose equivalent conversion coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground. *J Nucl Sci Technol.* 2014; 51: 1274–1287.
 - 21) Mikami S Tanaka H Matsuda H et al. The deposition densities of radiocesium and the air dose rates in undisturbed fields around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant; their

- temporal changes for five years after the accident. *J Environ Radioact.* 2019; 210: 105941.
- 22) Yoshimura K Watanabe T Kurikami H. Vertical and horizontal distributions of ^{137}Cs on paved surfaces affected by the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J Environ Radioact.* 2020; 217: 106213.

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

Kazuya Yoshimura

Japan Atomic Energy Agency • Senior researcher

Key word: Air dose rate, Cesium-137 activity per unit area, Urban area, Anthropogenic impacts

Abstract

This study aims to quantitatively evaluate the anthropogenic impact on the decreasing trend of air dose rates in urban areas. Two approaches were used in this study: one is an experimental investigation based on the monitoring of air dose rates and environmental radioactivity of ^{137}Cs per unit area (hereinafter "inventory") and simulation analysis using the monitoring data, and the other is statistical analysis using a large database of air dose rates and social indicators such as land use and aerosols. The air dose rates and inventories were measured at four model sites located in Okuma and Tomioka towns. The previous air dose rates and inventories obtained at the same sites were collected and the temporal decrease was analyzed. The air dose rates decreased faster in urban areas than in farmland, even without decontamination. The ^{137}Cs inventory on the pavement decreased with time due to wash-off, while the inventory on the soil ground did not change. These results suggest that the fast decrease in air dose rates in urban areas was resulted by the wash-off of radiocesium on the pavement. For the simulation analysis, geospatial information (digital elevation model, digital land surface model, land use data, building and tree data sets) and a program to create an environmental model representative of the urban area were prepared. We also obtained carbon survey data provided by the Nuclear Regulation Authority in Japan for the statistical analysis and completed data cleansing by supplementing deficient data and extracting abnormal data. Additionally, social indicators (land-covering and vegetation data, stray light data corrected in nighttime, and aerosol) were obtained for further analysis of anthropogenic impacts on temporal decrease in air dose rate.