

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04068

研究課題名(和文) 福島第一原発事故による避難指示区域への住民帰還のための除染評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of a method to evaluate effects of decontamination for residents return to evacuation order areas surrounding the Fukushima No.1 nuclear power plant

研究代表者

島田 洋子 (Shimada, Yoko)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：00314237

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、除染事業での除染前後の空間線量率、除染時期・場所、作業内容等に関する大量の情報を解析して除染効果に影響を及ぼす要因を分析し、その結果を踏まえて、市街地と森林における除染効果を、土壌表面のバックグラウンド放射線による影響や、除染後のウェザリング効果の影響を組み込んで定量的に評価した。さらに、これらの評価結果を参考に、住民帰還の最終目標とされる放射線量に至るために必要となる除染方法や費用を考慮した最適な除染計画を策定するための評価手法を提案した。本研究によって、避難指示区域への住民の帰還の前提となる除染が効果的に実施されるための最適な除染計画立案に有用な知見を提供することができた。

研究成果の概要(英文)：Based on the decontamination data of air dose rate and surface concentration of radioactive cesium, relationship between the decontamination effect and pre-decontamination radiation dose, monitoring term of pre-decontamination, and types of vegetation in forests and city areas are analyzed considering effects of the background radiation in soil surface and the weathering after decontamination. By reference to this analyzation, we tried to develop a method to establish optimal decontamination plans for residents return to evacuation order areas surrounding the Fukushima No.1 nuclear power plant from the perspective of both ways of decontamination and costs. Achievement of this study can supply a useful knowledge for the future decontamination policies.

研究分野：環境リスク工学

キーワード：放射線 除染 モデリング 最適化 森林 セシウム 土壌

## 1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日の福島第一原子力発電所事故の発生から2年半以上が経過した現在においても、多くの住民が避難生活を強いられている。現在、避難している住民がかつて住んでいた地域は、帰還困難地域、居住制限区域、避難指示解除準備区域の3区域に分類されている。そのうち、避難指示解除準備区域は、年間積算線量20ミリシーベルト以下となることが確実であると確認された地域であり、住民の一日も早い帰還をめざし、現在、除染やインフラ復旧等の対策が実施されている。国は、空間線量率で推定された年間積算線量が20ミリシーベルト以下になることが確実であり、インフラ等の住民の生活基盤が概ね復旧し、子どもの生活環境を中心とする除染作業が十分に進捗した後、県、市町村、住民との十分な協議を踏まえて、避難指示を解除するとしているが、帰還の選択は住民の判断にゆだねられることになる。復興庁による『平成25年度原子力被災自治体における住民意向調査結果報告書』によれば、各自治体の調査時点で戻る意思を示している人の割合は3割程度で、帰還を判断するための情報については、「インフラの復旧時期の目途」が最も高く、次いで「放射線量の低下の目途、除染成果の状況」で、避難指示区域への住民の帰還の判断に大きく影響を及ぼすのは除染の進捗であることがわかる。現在行われている福島県における生活圏の除染の進捗状況は、市街地では公共施設等約70%、住宅約50%、道路約30%、森林(生活圏)では約30%であり、当初の計画よりかなり遅れている。その原因としては、人手不足に加え膨大な費用の問題が挙げられ、この問題を解決し、除染を効果的に実施していくためには、除染効果と費用を双方向から評価し今後の最適な除染計画を立案することが必要である。

除染効果は、除染前後のモニタリングデータを用いた空間線量率の低減率を用いて分析されているが、以下の課題がある。

- 1) 除染手法や対象物ごとに分類して分析を行っているにとどまり、残留放射線量の要因まで明らかにし、なぜ低減率がこのような値になるかを定量的に解析していない。
- 2) 時間経過による放射性物質の変化、特にウェザリング効果による減衰を検討対象としていない。
- 3) 放射線量はその場の汚染源から受ける放射線量とバックグラウンドから受ける放射線量の合計値となるが、これらの分析ではバックグラウンドの放射線量による影響を排除する分析とはなっていない。

また、国は、現時点で必要となっている除染及び除染により発生する土壌等の保管に関する費用は示しているが、今後発生すると見込まれる費用は示していない。このため、保高ら(保高徹生、内藤航：除染の費用と効果に関する解析、第61回応用物理学会春季学術講演会講演予稿集、18p-D3-2、2014)は、

除染から中間貯蔵施設における保管までに必要な費用について、複数のシナリオを設定して、対象地域内を100mメッシュに区切り地理情報と除染情報(低減率・廃棄物発生量、除染費用等)から除染費用等を試算している。しかしながら、この試算では、第1に、マクロ的な分析で行われており、個々の除染方法の費用等を解析しておらず、除染計画の意志決定には応用しにくい。第2に、除染費用の多くを労務費が多くを占めているが、その時間的な変化を考慮に入れていない。第3に、除染により発生する土壌等の取扱い(保管、輸送、中間貯蔵施設の建設・維持運営、最終処分)についてのシナリオと現実との間で乖離がみられる。

森林の除染については、環境省・環境回復検討会による『今後の森林除染の在り方に関する当面の整理について』における森林の3つの分類(「エリアA：住居近隣の森林」、「エリアB：作業等が日常的に立ち入る森林およびキャンプ場などのレクリエーションのための場」、「エリアC：その他の森林」)のうち、現在除染対象となっているのはエリアAである。エリアBは、帰還後の住民の生活を考える上で、林業の復興や子どもの生活環境に関わるエリアであることから、今後、除染の対象として除染対象区域の決定や除染方法を検討する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、市街地と森林における除染効果と費用を考慮した最適な除染計画を策定するための評価手法を開発し、現在実施されている除染の評価を行い、その結果を踏まえて、避難指示区域への住民の帰還の前提となる除染が効果的に実施されるための最適な除染計画を立案するための有用な知見を提供することを目的とする。

## 3. 研究の方法

### (1) 除染効果の評価手法の確立

#### 除染データの解析

これまで実施された環境省や自治体による除染事業での住宅地、道路、農地、森林、公共施設等における除染前後の空間線量率データ、除染時期、除染場所(傾斜、植生・樹種(広葉樹、針葉樹等)土壌種)、気象(降水量、測定時の天候)、作業内容(測定方法、作業監督者・作業員の熟練度)に関する情報を収集・整理し、市街地と森林の除染効果に影響を及ぼしている要因の分析を行えるようにデータベース化する。

#### 市街地における除染効果の評価手法の確立

土壌表面におけるバックグラウンド放射線による除染効果算定への影響を評価するモデルを構築する。さらに、除染対象物ごとに、ウェザリング効果(浸透や外部系への移行等)をモデルに組み込み、除染方法、除染対象物、線量等の除染効果に影響を及ぼす要

因ごとに放射線量の低減率を時間の関数により評価できるモデルを構築し、市街地における除染効果を解析する。

#### 森林における除染効果の評価手法の確立

森林生態系における放射性物質の挙動を評価するモデルの構築し、このモデルで整備したデータベースを用いて検証するとともに、除染時期、傾斜の有無、樹種（広葉樹、針葉樹等）、土壌種、降水量等の要因を明らかにする。除染効果を支配する要因を考慮した今後の森林の除染時期や除染範囲等を定めた除染シナリオを作成して、森林土壌中の放射性物質濃度を将来予測することにより、住民の帰還目標である年間積算線量 20 ミリシーベルト以下、さらに最終目標である 1 ミリシーベルトに放射線量を低減させるための最適な森林除染の在り方を分析する

#### (2) 除染費用の構造解析およびシナリオ分析

まず、除染に必要な費用を構成する要素について、環境省などの行政資料及び事業者に対するヒアリング調査を通じて明らかにする。この際には、特に、時間経過により変化が見込まれる要因（人数、人件費、投入する機材の量）に留意する。その後、除染費用の見積もり範囲（最終処分まで算入するか等）を複数のシナリオとして示したうえで、除染手法ごとに単位面積あたり必要となる費用の試算を行う。特に、時間による変動をも加味した上で、除染費用の大部分を占める労務費による影響を勘案して費用分析を行う。

#### (3) 除染効果と費用を考慮した最適な除染計画を策定するためのモデル構築

(1)と(2)の結果を用いて、市街地と森林における除染方法ごとに、単位費用あたりの放射線量の減少量（除染効率）の算定を行う。この結果を用いて、目標とする放射線量（除染及び自然減衰の双方の効果を加味したもの）に至るために必要となる費用を、除染対象区域及び外縁地域（外縁地域は、それより外側から除染対象地域への影響が無視できる程度の広さを有した区域）をゾーンで分割して最適化するモデルの構築を試みる。

### 4. 研究成果

#### (1) 除染効果の評価手法の確立

市街地および森林の除染効果の評価手法を確立するために、まず、これまで実施された環境省や自治体による除染事業での住宅地、道路、農地、森林、公共施設等における除染前後の空間線量率データ、除染時期、除染場所（傾斜、植生・樹種（広葉樹、針葉樹等）、土壌種）、気象（降水量、測定時の天候）、作業内容（測定方法、作業監督者・作業員の熟練度）に関する情報を収集・整理し、市街地と森林の除染効果に影響を及ぼしている要因の分析を行えるようにデータベース化し、このデータベースを用いて、除染前と除

染後の空間線量率と空間線量率の低減率の関係を分析するとともに、森林地域については、植生に関する地理情報、現地における放射性セシウムの深度分布調査等により、森林除染の効果に及ぼす要因に関する分析を行った。その結果、除染前の空間線量率等が高いほど、空間線量率等の低減率は高くなったが、ある程度の空間線量率等以上では、低減率がほぼ一定となった(図 1)。

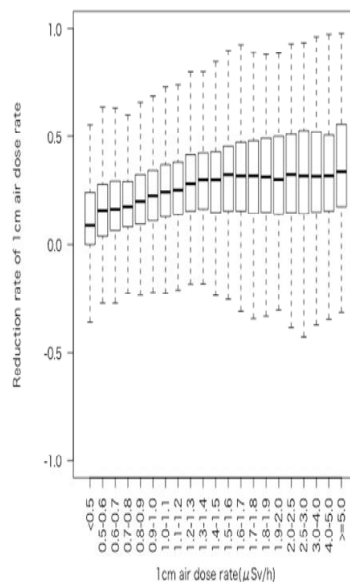


図 1 除染前の地上高 1cm 空間線量率とその低減率の関係

除染前の空間線量率等の測定時期については、各月ごとに多少の増減はあったものの、全体的には減少傾向にあった。また、植生図を用いて、樹種ごとの空間線量率等の低減率を分析したところ、落葉針葉樹植林の低減率が他の樹種と比較して大きく、常緑針葉樹植林が低いなど、樹種ごとにも差が見られた。放射性物質の深度分布について、現地調査を行ったところ、樹種ごとに深度分布が異なっており、浸透の程度と、1cm 空間線量率及び表面汚染密度の低減率との間に強い相関が見られた。

この分析結果を踏まえて、森林土壌や市街地の道路表面におけるバックグラウンド放射線による影響と除染後のウェザリング効果による減衰効果を評価することにより放射性物質の表面残存状況を定量的に把握できるモデルの構築をめざした。具体的には、森林、舗装道路および未舗装道路の除染実施前の表面線量率と表面汚染密度の測定値（2012年9月～2014年12月）を用いて散布図を作成してその関係を検討した。その結果、いずれの月についても、舗装道路については、低い表面線量率であっても、表面汚染密度は高い値を示す傾向があり、森林や未舗装道路の表面汚染密度は低い値を示した(図 2)。

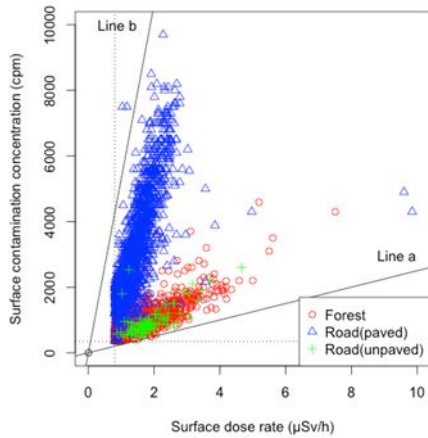


図2 森林、舗装道路および未舗装道路の除染実施前の表面線量率と表面汚染密度の測定値（2012年10月）

また、作成した散布図を基に、放射性セシウムの表面残存状況を示す指標としてSRI(Surface Residual Index)を定義した。具体的には、各測定点から直線Aまでの距離をベースに、1cm空間線量率（から算出される表面汚染密度）で標準化する。SRIが大きいほど線の影響が残っており、放射性セシウムが表面に残存していることを示している。

$$SRI = (y_2 - y_1) / y_1$$

$$y_1 = 300x_1$$

ここで、 $x_1$  ( $\mu\text{Sv/h}$ )は測定点の表面線量率、 $y_2$  (cpm)は測定点の表面汚染密度であり、また、 $y_2 - y_1 < 0$ のときは $SRI = 0$ とした。

SRI値の経時変化を確認したところ、森林や未舗装道路では、放射性セシウムの沈着後約1年半が経過した段階で既に土壌等の表面にはほとんど存在せず地下方向にある程度浸透していたが、舗装道路では、依然として物質の表面に残存している可能性が示唆された(図3)。

以上より、除染が行われている道路や森林の土壌表面のバックグラウンド放射線による影響評価、除染後のウェザリング効果の評価に加えて、放射性セシウムの表面残存状況を表面線量率と表面汚染密度を測定することによって評価し、除染対象物、線量等の除染効果に影響を及ぼす要因ごとに放射線量の低減率を時間の関数により評価できるモデルを構築することができた。

(2) 除染効果と費用を考慮した最適な除染計画を策定するためのモデル構築

これまでに得られた市街地および森林における除染効果の評価に関する知見を参考に、住民帰還の最終目標である年間積算線量（除染及び自然減衰の双方の効果を加味）の放射線量に至るために必要となる除染方法や費用を考慮した最適な除染計画を策定するためのモデル構築をめざし、まず、除染対象の森林に囲まれた市街地域をゾーン分割し、学校、市街中心地、住宅地域および田畑

の配置を仮定した街モデル(図4)を作り、カテゴリ分類した住民の生活時間の設定を行った上で、遺伝アルゴリズムを用いて森林の除染場所の最適な配置を探し出す手法の開発を試みた。簡単な仮定によるモデルではあるが、除染対象の森林の除染を一様に進めるよりも、最適な除染場所の配置で除染を進める方が、除染効果が高いことを明らかにすることができ、最適化モデル開発への足がかりを作ることができた。

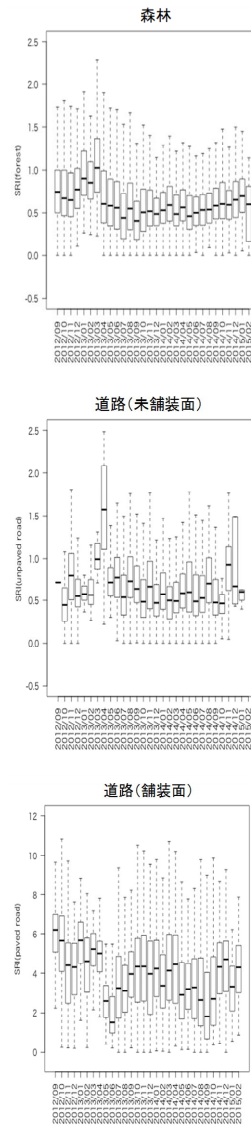
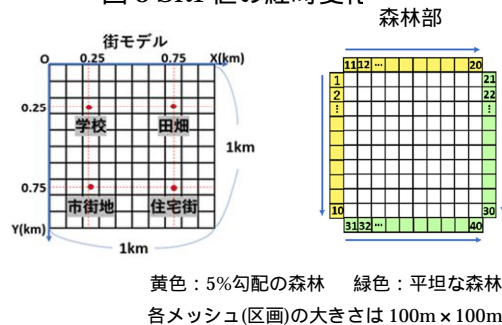


図3 SRI値の経時変化



黄色：5%勾配の森林 緑色：平坦な森林  
各メッシュ(区画)の大きさは100m×100m

図4 街モデル

### (3)本研究の成果の位置づけと今後の展望

本研究は、現在までの除染に関する大量の情報を解析することにより除染効果に影響を及ぼす要因の分析結果を踏まえて除染効果の総合的な評価を試みているところに特色がある。

本研究において、現在除染が比較的進んでいる市街地での除染効果の評価に、土壌表面のバックグラウンド放射線による影響や、除染が行われた後の放射性物質のウェザリング効果の影響のメカニズムを組み込んで評価するモデルを示したこと、現在は生活圏に接した部分しか除染が行われていない森林の除染効果の評価には、森林生態系における放射性物質の動態を評価するモデルを組み込んで除染効果を定量的に評価できるモデルを示したこと、さらに、これらのモデルによる評価と費用分析とを組み合わせることで除染効果を総合的に評価する手法を提案し開発に取り掛かったことは、住民の帰還に際してのリスクコミュニケーションにおいて貢献でき、帰還後の林業の復興や住民のリレクレーション等に関わるエリアで今後除染が必要となる際の最適な除染計画立案に有用な知見を提供できたことに大きな意義がある。

しかし、除染費用の見積もり範囲のデータの収集・調査結果を基に、除染手法ごとに単位面積あたり必要となる費用の試算を時間による変動をも加味した上で費用分析を行い、今後の除染計画に関しての複数のシナリオを設定してその除染効果と総費用の変化を推定した結果も考慮して、最適な除染計画を策定するモデルへと発展させるという当初の最終目標を、本基盤研究の研究期間に完遂することができなかったことから、研究期間終了後も引き続き継続して研究を行い、その成果を論文にまとめて発表するとともに、帰還に際してのリスクコミュニケーションや除染計画立案にその知見を役立てていただけるように研究成果の情報を提供する予定である。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計5件)

Yoshitomo MORI, Minoru YONEDA, Yoko SHIMADA, Satoshi FUKUTANI, Maiko IKEGAMI, Ryohei SHIMOMURA, Analysis on the influence of forest soil characteristics on radioactive Cs infiltration and evaluation of residual radioactive Cs on surfaces, Environmental Monitoring and Assessment, DOI: 10.1007/s10661-018-6571-0, 2018. (査読有)

森芳友, 米田稔, 島田洋子, 福谷哲, 池上麻衣子, 下村遼平, 森林の土壌性状が放

射性セシウムの地下浸透に及ぼす影響に関する分析, 環境放射能除染学会誌, Vol.5, No.2, pp.95-107, 2017. (査読有)

森芳友, 米田稔, 島田洋子, 福谷哲, 池上麻衣子, 表面線量率及び表面汚染密度の測定による放射性セシウムの表面残存状況の評価, 環境放射能除染学会誌, Vol.5, No.1, pp.3-15, 2017. (査読有)

下村遼平, 近藤均, 島田洋子, 米田稔, 公衆被ばく線量限度とリスク等価な帰還時被ばく線量の推計, 環境放射能除染学会誌, Vol.4, No.4, pp.325-335, 2016. (査読有)

森芳友, 米田稔, 島田洋子, 福谷哲, 池上麻衣子, 統計的手法及び深度分布調査による森林除染の効果に影響を及ぼす要因に関する分析, 環境放射能除染学会誌, Vol.4, No.4, pp.313-324, 2016. (査読有)

### 〔学会発表〕(計3件)

池上麻衣子, 米田稔, Nguyen Thi Thuong, 福谷哲, 高瀬雄平, 米谷達成, 芳山勇人, 島田洋子, 松井康人, Cs と Sr の土壌からの溶出率に及ぼす燃焼温度と湿潤乾燥サイクルの影響, 環境放射能除染学会第4回研究発表会, 2015.

森芳友, 米田稔, 森林除染の効果に影響を及ぼす要因の分析, 環境放射能除染学会第4回研究発表会, 2015.

森芳友, 米田稔, 島田洋子, 福谷哲, 池上麻衣子, 1cm空間線量率及び表面汚染密度の測定による放射性Csの表面残存状況の評価, 環境放射能除染学会第5回研究発表会, 2016.

### 〔図書〕(計0件)

### 〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

### 〔その他〕

なし

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

島田 洋子 (Shimada Yoko)  
京都大学・工学研究科・准教授  
研究者番号: 00314237

### (2)研究分担者

米田 稔 (Yoneda Minoru)  
京都大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 40182852

(3)連携研究者 なし

(4)研究協力者 なし