

令和元年6月4日現在

機関番号：82105

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04945

研究課題名（和文）森林放射性セシウム動態データベースの構築とマルチモデルによる将来予測

研究課題名（英文）Database construction and multi-model prediction of radiocesium dynamics in Fukushima forests

研究代表者

橋本 昌司（Hashimoto, Shoji）

国立研究開発法人森林研究・整備機構・森林総合研究所・主任研究員

研究者番号：90414490

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,500,000円

研究成果の概要（和文）：福島第一原子力発電所事故で汚染された地域の約7割が森林です。森林に降下した放射性セシウムは、森林内での分布が変化していくことが知られており、事故後の観測においても森林内の動態把握が重要です。本研究では、福島の森林における放射性セシウムの分布に関わるデータを収集し、データベースを構築しました。またモデルシミュレーションを行い、放射性セシウムの森林内の分布予測と特に木材の中の放射性セシウム濃度を予測しました。

研究成果の学術的意義や社会的意義

福島第一原子力発電所事故以降、研究機関や行政機関により森林内の放射性セシウムの動きに関わるデータがたくさん取られてきましたが、それらはばらばらに報告されておりまとまっていません。そこで、本研究では様々な学術雑誌や報告書に報告されたデータを収集し、一つのファイルに入力してデータベースを構築しました。またそのデータとモデルを用いて、森林の中の放射性セシウムの動きを予測（シミュレーション）しました。そのマップ化も行いました。この研究は森林の放射性セシウムの動きに関する包括的理解と予測を提供するもので、被災地域のこれまでの、そしてこれからの森林管理を考える上で大変有用な情報となります。

研究成果の概要（英文）：The majority of the area contaminated by the Fukushima nuclear power plant accident is covered with forests. The radiocesium deposited on forests migrates within the forest ecosystems. In this study, we collated data about radiocesium dynamics in forests and constructed a database. Also, we developed and parameterized two radionuclide models for forest ecosystems (RIFE1 and FoRothCs) and predicted the future dynamics of radiocesium within forests. We further combined the temporal simulation with spatial datasets and built a prediction map for wood contamination.

研究分野：森林科学

キーワード：放射性セシウム 森林 福島 データベース モデル

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 2011年3月、巨大地震を引き金に東京電力福島第一原子力発電所が放射能漏れ事故を起こした。汚染された地域の約7割は森林であり^{引用文献①}、半減期の長い放射性セシウムによる汚染が深刻である。森林に降下した放射性セシウムは、森林内での分布が変化していくことが知られており、事故後の観測においても森林内の動態把握が重要となる。

(2) しかしながら、研究開始当初は福島で観測されたデータが、国内外の学術雑誌、行政の報告書やウェブなどにばらばらに報告されており、まとめて参照できるものがなかった。また、チェルノブイリ事故後に開発されたモデルは多くが入手困難な状態にあったこともあり、福島事故後の観測データを、モデルなどを用いて統合的に解析する研究が不足していた。

2. 研究の目的

以上の背景から、本研究は以下の目標を設定して行われた。

(1) 独自の多点観測と、2011年以降に観測されたデータを最大限収集整理しデータベースを構築する。そのデータベースをメタ解析する。

(2) データベースとメタ解析の結果を用いて複数の森林内放射性セシウム動態予測モデルの構築とパラメータ決定を行う。

(3) モデルを相互比較することにより、モデルの構造による不確実性も含めた森林内の放射性セシウムの動態予測を長期・広域で行う。

(4) 構築したデータベースをオープンアクセスのデータベースとして公開していく。

(5) 構築したモデルをウェブでソースコードに加えてソフトウェアにして公開し、他の研究者が利用できるとともに、今後世界のどこかで起こるかもしれない同様の放射能漏れ事故時に、迅速にモデルが利用できるようにアーカイブ化する。

3. 研究の方法

(1) 福島の放射性セシウム観測データが報告されている学術論文および林野庁事業の報告書、Webのモニタリング情報をもとに、データベースを構築した。データベースは、利用しやすさを考慮し、マイクロソフト社のエクセルを採用した。データベースには、文献情報、位置情報、森林の属性情報（林齢や樹種など）、放射性セシウム情報（各部位の単位重量あたりのセシウム量および単位面積あたりのセシウム量やその測定法）を入力していくが、位置情報から、外部データから得られる気温や降水量、航空機モニタリングのデータが入力できるようにした。

(2) FoRothCsモデル^{引用文献②}を森林総合研究所のモニタリングデータ^{引用文献③④⑤}でチューニングを行った。RIFE1モデル^{引用文献⑥}をR言語で組み直し、構造を再検討し、複数樹種に対応するなど改良を行った。また、幹材成長モデルを組み合わせ、幹材のセシウム濃度を取り扱えるようにした。その後、FoRothCsモデルと同様に、森林総合研究所のモニタリングデータでチューニングを行った。両方のモデルを用いて、事故後20年間の幹材の¹³⁷Cs濃度を予測した。RIFE1モデルの出力を航空機モニタリングデータと植生分布データと組み合わせ、広域での幹材中の¹³⁷Cs濃度のマップを構築した。

4. 研究成果

(1) データベースの構築

構築したデータベースは、73本の学術論文と35報の報告書、1つのウェブ上のモニタリングデータから収集し、総レコード数は約16500点となった。内訳としては、濃度データが13800点、インベントリーデータが約3800点となった（注意：レコードによっては、濃度とインベントリーの両方のデータを持つ）。濃度データに関して、樹木、土壌、小動物、きのこの別ではそれぞれ、約8600点、4600点、200点、3000点となった。なお、今回は大型哺乳動物を対象としていない。

樹木データについて樹種別に調べたところスギが一番多くその他ヒノキ、マツ、コナラのデータが多かった。しかし、椎茸原木として重要なコナラに関しては、それらの主要樹種の中ではデータが少なかった。

(2) メタ解析

得られた濃度データを、航空機モニタリングから得られた総沈着量で正規化し、正規化濃度(Normalized concentration)を主要な樹種の各部位に対して求めた。正規化濃度にすることで、異なる汚染度の地域で取られたデータも統一的に取り扱うことができる。

正規化濃度の時間的変化は部位によって異なった。例えばスギに関してみると、スギの葉の正規化濃度は減少傾向を見せたが、幹材の濃度は微増傾向を示した。このように、多くのデータを集めて、正規化濃度として比較することで、より一般性のある濃度の推移が明らかとな

った。データベースの構築とメタ解析は、Nottingham 大学（英）の George Shaw 教授、ANDRA（仏）の Yves Thiry 博士、IAEA プロジェクトのメンバーの助言を受けながら行った。

(3) FoRothCs モデルの新しいパラメータ決定

国立環境研究所で開発した FoRothCs モデルでは、樹木の各部位の放射性物質濃度をベースに森林内の放射性物質循環をシミュレートする。各部位の濃度は、部位や観測年により数オーダーに渡って違い（変化）があるため、モデルのパラメータ決定の際に困難が生じる場合があった。そこで、濃度を直接利用せず、指数関数を適用してその係数をチューニングの対象にし、Approximate Bayesian computation（近似ベイズ計算）法を適用したところ、モデルのパラメータ決定が改善され、各部位の濃度予測のパフォーマンスが改善した（5. 主な発表論文等の雑誌論文 ① Nishina et al. 2018）。モデルのコードは Github repository で公開した。

(4) 改良版 RIFE1 モデルおよびモデルによる予測

森林総合研究所が行っているモニタリングサイトのデータに対して、RIFE1 モデルを適用した。RIFE1 モデルは、単位体積あたりの放射性物質をシミュレートするものであるが、幹材の成長モデルを組み合わせることで、林産物として重要な幹材部分の放射性セシウム濃度をシミュレート可能にした。またオリジナルの RIFE1 モデルは単一樹種を対象にしているが、実際のモニタリングサイトでは、常緑針葉樹と落葉広葉樹が混在していた。そのため、モデルを改良し、単一・複数樹種を対象に対応できるようにした。その結果、樹種ごとに異なる幹材中の放射性セシウム濃度の時間的変化がそれぞれ良好に再現することができた。

スギ・コナラ・アカマツの事故後 20 年の幹材中の ^{137}Cs 濃度予測を示す（図 1）。川内サイト、大玉サイトそれぞれのサイトでパラメータ決定を行った。大きく増加するコナラ、減少するアカマツに対して、あまり変化しないスギのそれぞれの時間的変化を的確に表現できている。

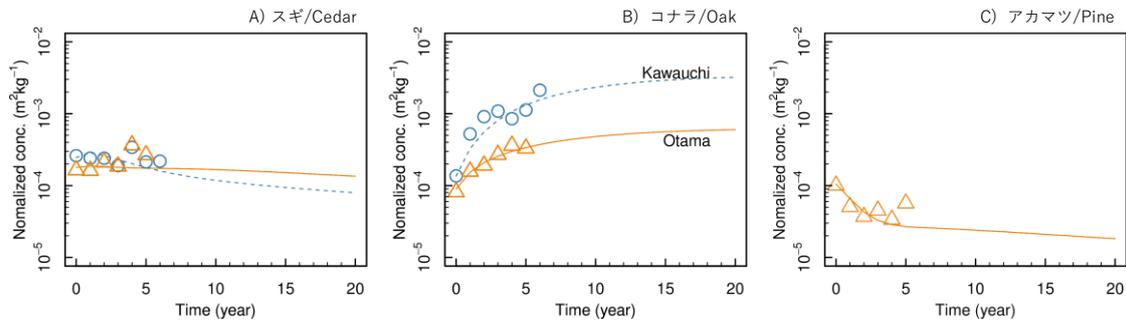


図 1: 観測された正規化濃度と事故後 20 年の正規化濃度のモデル予測

(5) 複数モデル（マルチモデル）予測

事故後のスギの幹材中の ^{137}Cs の濃度変化を RIFE1 と FoRothCs で比較した（図 2）。両方のモデルで大きな差は無いが、FoRothCs モデルは RIFE1 モデルよりも将来の濃度を低めに予測している。特に大玉サイトの予測は、FoRothCs モデルの方が 1 オーダー程度低い。また RIFE1 モデルの方が時間的変化が小さかった。

(6) 広域予測

RIFE1 モデルの結果を航空機モニタリングデータおよび植生マップと結合し、幹材中の ^{137}Cs 濃度予測マップを作成した（図 3）。航空機モニタリングの解像度は 250m であるが、植生マップの解像度は 1km であり、常緑針葉樹にスギ林のシミュレーション結果を落葉広葉樹にコナラ林の結果を当てはめて予測を行った。安全寄り（リスクを大きめに）の予測を行うため、スギは大玉サイトの結果、コナラは川内サイトの結果を用いた。図 1 のようにコナラでは濃度上昇が明確なため、マップ上でも落葉広葉樹の分布地域では濃度が明確に増大している。その増大は特に 10 年目までで大きい。

ただし注意点としては、今回 1km の解像度の植生図を用いたが、実際の森林の分布はもっと細かい。また現実には同じ地点に常緑針葉樹と落葉広葉樹の両方が分布することもある。またこれまでの観測から明らかになっているように、同じ樹種・同程度の総沈着量であっても濃度が異なることがある。今後も、モニタリングとそれを用いたモデルの検証と再調整を継続することが必要である。しかし、このようにマップ化することで、今後の森林管理を考えるうえで役

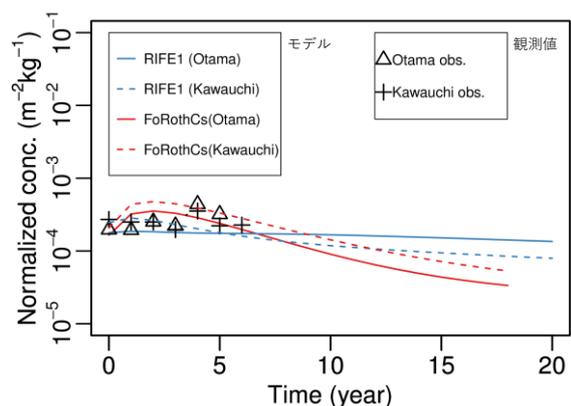


図 2: RIFE1 と FoRothCs によるスギの幹材中の ^{137}Cs 濃度予測（正規化濃度）

立つ情報を提供できた。

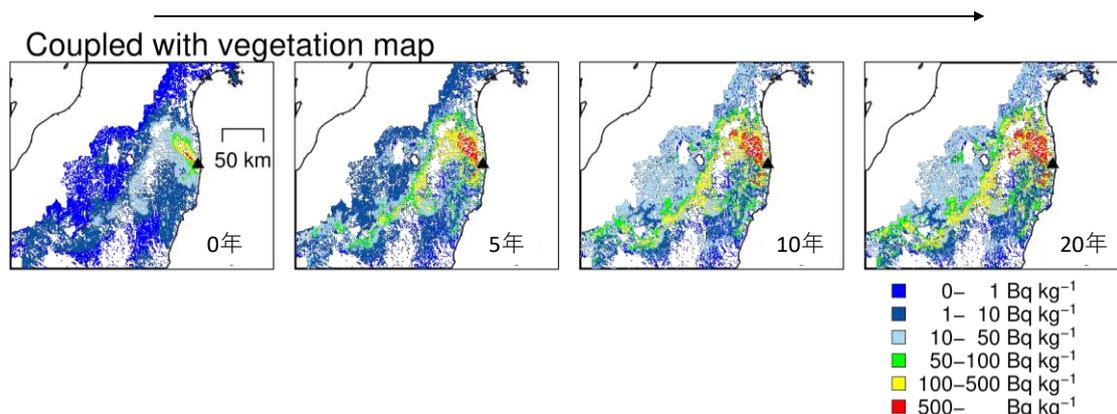


図 3: 幹材中の ¹³⁷Cs の濃度予測 (事故後の年数)

(7) アウトリーチ

研究期間中、2 回の国際シンポジウムを開催した (5. 主な発表論文等 [その他])。シンポジウムでは、欧州から専門家を招へいして行った。また、国際原子力機関のプロジェクト (MODARIAII) のワーキンググループ 4 福島サブグループに参画し、構築したデータベースを基に日本の森林データを報告した。ウィーンにおける全体会合に 3 回、日本で行われた中間会合に 2 回、ウィーンにおける編集会議に 1 回参加した。現在公式報告書を執筆中である。

<引用文献>

- ① Hashimoto S. et al. (2012) The total amounts of radioactively contaminated materials in forests in Fukushima, Japan. *Scientific Reports*, 2:416
- ② Nishina Kazuya, Hayashi Seiji (2015) Modeling radionuclide Cs and C dynamics in an artificial forest ecosystem in Japan -FoRothCs ver1.0- *Frontiers in Environmental Science*, 3:61
- ③ Imamura, N., M. Komatsu, S. Ohashi, S. Hashimoto, et al. (2017) Temporal changes in the radiocesium distribution in forests over the five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Scientific Reports*, 7:8179
- ④ Ohashi, S. et al. (2017) Temporal trends in ¹³⁷Cs concentrations in the bark, sapwood, heartwood, and whole wood of four tree species in Japanese forests from 2011 to 2016. *Journal of Environmental Radioactivity*, 178-179:335-342
- ⑤ Komatsu, M. et al. (2016) Characteristics of initial deposition and behavior of radiocesium in forest ecosystems of different locations and species affected by the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 161:2-10
- ⑥ Hashimoto, S. et al. (2013) Predicted spatio-temporal dynamics of radiocesium deposited onto forests following the Fukushima nuclear accident. *Scientific Reports*, 3:2564

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Nishina, Kazuya, Shoji Hashimoto, Naohiro Imamura, Shinta Ohashi, Masabumi Komatsu, Shinji Kaneko, Seiji Hayashi (2018) Calibration of forest ¹³⁷Cs cycling model "FoRothCs" via approximate Bayesian computation based on 6-year observations from plantation forests in Fukushima. *Journal of Environmental Radioactivity*, Vol. 193-194:82-90, DOI: 10.1016/j.jenvrad.2018.09.002
- ② 金子 真司 (2018) 森にとどまる放射性セシウム 樹木の葉・幹から土壌表層に移動 作業では土砂流出を防ぐ配慮を. *グリーン・パワー*, 8:10-11
- ③ 小松 雅史, (2017) 放射性セシウムの森林内への初期沈着, *水利科学*, 4(61):3-18
- ④ Imamura, Naohiro, Masabumi Komatsu, Shinta Ohashi, Shoji Hashimoto, Takuya Kajimoto, Shinji Kaneko, Tsutomu Takano (2017) Temporal changes in the radiocesium distribution in forests over the five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Scientific Reports*, 7:8179, DOI: 10.1038/s41598-017-08261-x
- ⑤ 橋本 昌司 (2016) 森林内放射性セシウムの時空間変動モデリング. *JATAFF ジャーナル* 4:18-23

[学会発表] (計 12 件)

- ① Hashimoto Shoji, Imamura Naohiro, Kaneko Shinji, Komatsu Masabumi, Matsuura Toshiya, Nishina Kazuya, Ohashi Shinta, A database on radiocesium dynamics in Fukushima, European Geosciences Union General Assembly 2018(国際学会), 2018
- ② Nishina Kazuya, Hashimoto Shoji, Imamura Naohiro, Ohashi Shinta, Komatsu Masabumi, Kaneko Shinji, Hayashi Seiji, Development and application of forest ¹³⁷Cs cycling model “FoRothCs”, 日本地球惑星科学連合大会(2018)(国際学会), 2018
- ③ 小松 雅史, 公開データを用いた野生きのこの放射性セシウム濃度の広域的解析, 日本きのこ学会第21回大会, 2017
- ④ 橋本 昌司, 今村 直広, 金子 真司, 小松 雅史, 松浦 俊也, 仁科 一哉, 大橋 伸太, 森林内における放射性セシウム動態のデータベース構築 2, 第129回日本森林学会大会, 2018
- ⑤ 大橋 伸太, 小松 雅史, 今村 直広, 橋本 昌司, 材および樹皮中の ¹³⁷Cs 濃度の経年変化傾向: 樹種・サイト依存性について, 第129回日本森林学会大会, 2018
- ⑥ 金子 真司, 赤間 亮夫, 藤原 健, 橋本 昌司, 平井 敬三, 池田 重人, 今村 直広, 梶本 卓也, 川崎 達郎, 小林 政広, 小松 雅史, 三浦 寛, 大橋 伸太, 大貫 靖浩, 小野 賢二, 齊藤 哲, 阪田 匡司, 鈴木 養樹, 高野 勉, 森林内の放射性セシウムの分布・動態に及ぼす乾性・湿性沈着の影響, 第128回日本森林学会大会, 2017
- ⑦ 橋本 昌司, 今村 直広, 金子 真司, 小松 雅史, 松浦 俊也, 仁科 一哉, 大橋 伸太, 森林内における放射性セシウム動態のデータベース構築, 第128回日本森林学会大会, 2017
- ⑧ 小松 雅史, 橋本 昌司, 根田 仁, モニタリングデータを用いた野生きのこの放射性セシウム汚染の解析, 第128回日本森林学会大会, 2017
- ⑨ 仁科 一哉, 林 誠二, 近似ベイズ計算を用いた放射性 Cs 動態モデル” FoRothCs” のパラメータ推定, 第64回日本生態学会大会, 2017
- ⑩ Kaneko Shinji, Change of radiocesium contamination in the forests for five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, IUFRO Regional Congress for Asia and Oceania 2016 (国際学会), 2016
- ⑪ 柴田 麻帆, 小松 雅史, 太田 祐子, 阿部 恭久, 日本大学水上演習林におけるきのこ類と土壌の放射性セシウム濃度, 第6回関東森林学会大会, 2016
- ⑫ 金子 真司, 森林環境における放射性 Cs の分布と挙動 - 森林・林業の復興にむけての課題 -, 日本土壌肥料学会大会 2016 年度佐賀大会, 2016

[その他]

- ① 金子 真司(2018) 新刊紹介: 福島原発事故と福島の農業. 森林立地, Vol 60: 35.
- ② 金子 真司(2017) 水利科学の新連載について 森林における放射性物質の特集・シリーズ化にあたって. 水利科学. Vol161: 1-2

国際シンポジウム開催

- ① チェルノブイリと福島の調査から森林の放射能汚染対策を考える (2018年6月5日、東京大学にて)
http://www.agc.a.u-tokyo.ac.jp/wp/fg6_180605/
- ② チェルノブイリと福島の観測から考える森林の放射性セシウムの今後 (2017年7月12日、森林総合研究所にて)
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/event/2017/20170712cesium/index-2.html>

国際原子力機関(IAEA)のMODARIA II プロジェクトへの貢献(2016年~2019年)

- ① Consultancy Meeting to begin drafting the IAEA TECDOC entitled 'Environmental behaviour of radionuclides released after the Fukushima Accident (2018年ウィーン IAEA 本部)
- ② 第3回 Technical meeting (2018年ウィーン IAEA 本部)
- ③ ワーキンググループ4 サブグループ2 福島データ中間会合(2018年福島大学)
- ④ 第2回 Technical meeting (2017年ウィーン IAEA 本部)
- ⑤ ワーキンググループ4 サブグループ2 福島データ中間会合(2017年筑波大学)
- ⑥ 第1回 Technical meeting (2016年ウィーン IAEA 本部)

参加者リスト、議事次第、発表プレゼンテーション等

<https://gnssn.iaea.org/RTWS/modaria/Shared%20Documents/Forms/AllItems.aspx?RootFolder=%2FRTWS%2Fmodaria%2FShared%20Documents%2FMODARIA%20II%2FMODARIA%20II%20Working%20Groups%2FMODARIA%20II%20WG4%20-%20Data%20for%20Impact%20Assessment&FolderCTID=0x0120002E96A39C44735344AFE7141A55E798A1&View=%7B8A385A9B-3D19-46E8-9CDA-BD10A5990D6E%7D>

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：松浦 俊也

ローマ字氏名：(MATSUURA, toshiya)

所属研究機関名：国立研究開発法人森林研究・整備機構

部局名：森林総合研究所

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：00575277

研究分担者氏名：仁科 一哉

ローマ字氏名：(NISHINA, kazuya)

所属研究機関名：国立研究開発法人国立環境研究所

部局名：地域環境研究センター

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：60637776

研究分担者氏名：大橋 伸太

ローマ字氏名：(OHASHI, shinta)

所属研究機関名：国立研究開発法人森林研究・整備機構

部局名：森林総合研究所

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：70754315

研究分担者氏名：金子 真司

ローマ字氏名：(KANEKO, shinji)

所属研究機関名：国立研究開発法人森林研究・整備機構

部局名：森林総合研究所

職名：再雇用研究専門員

研究者番号（8桁）：80353647

研究分担者氏名：小松 雅史

ローマ字氏名：(KOMATSU, masabumi)

所属研究機関名：国立研究開発法人森林研究・整備機構

部局名：森林総合研究所

職名：主任研究員

研究者番号（8桁）：90737313

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。