

2022年7月15日

報道関係者各位

国立大学法人筑波大学

国立大学法人福島大学

独立行政法人国立高等専門学校機構 津山工業高等専門学校

## 福島原発事故後の除染が下流域に及ぼした影響を初評価 ～土砂流出一時増も放射性セシウム濃度低下と植生回復が影響低減～

東京電力福島第一原発事故は、近隣の大規模集水域に長期的な放射能汚染を引き起こしました。その後、政府主導の農地除染により放射性セシウム ( $^{137}\text{Cs}$ ) で汚染された土壌が除去され、除染地域の放射線リスクは低減しました。しかし、除染が下流域に及ぼす長期的な影響は不明のままです。

本研究では、広範囲に農地除染が行われた福島県の新田川流域を対象に、2013～2018年までの間に除染が下流域に及ぼした影響を初めて評価しました。評価は、政府の除染データ、高解像度衛星画像を用いた土地被覆変化のデータ、河川のモニタリングデータを組み合わせて行いました。

その結果、除染期間中（2013-2016年）は除染地域で土壌の侵食量が増え、下流への浮遊土砂の流出量がそれ以前の2倍程度になったことが分かりました。一方、除染の進展に伴い、泥や砂に付着した $^{137}\text{Cs}$ （懸濁態 $^{137}\text{Cs}$ ）の濃度は大幅に低下しました。除染によって、河川に流入する土壌の $^{137}\text{Cs}$ 濃度が下がったためと考えられました。浮遊土砂の下流への流出増も、1～2年程度で収まりました。除染地域は降水量が多く、植生の自然回復が速やかに進んだためとみられます。土砂流出増が懸濁態 $^{137}\text{Cs}$ 濃度の低下によって相殺されたため、海洋へ流出する $^{137}\text{Cs}$ の総量には、除染による大幅な増加や減少は認められませんでした。

放射能汚染に限らず、土地改変による環境修復が必要となった地域においては、土地改変後の植生の自然回復条件の事前評価や、流域の規制枠組みに対応した緑化対策を準備しておくことが求められます。本研究成果は、長期に及ぶ除染活動が、下流域の持続可能性（Sustainability）に与える影響を最小化することに役立つと期待されます。

### 研究代表者

筑波大学生命環境系／アイソトープ環境動態研究センター（CRIED）

恩田 裕一 教授

福島大学環境放射能研究所

脇山 義史 准教授

津山工業高等専門学校総合理工学科

谷口 圭輔 講師

## 研究の背景

原子力産業活動や原子力事故による放射性物質の漏えいは、環境と経済の両面で大きな脅威です。東京電力福島第一原発事故では、半減期が比較的長い放射性セシウム<sup>注1)</sup>を含む放射性物質が大量に放出されました。政府主導の除染により放射性セシウムで汚染された土壌が除去され、放射線リスクは低減しましたが、除染が下流域に及ぼす長期的影響は不明のままです。

福島県内の帰還困難区域を中心とした地域では、2012年から大規模な除染が実施されました。数年のうちに表土の5cmと植生が除去され、非汚染土壌に置き換わったため、土地被覆が減少しましたが、その後に植生が回復し、によってこれらの除染地域では土地被覆が再び回復しました。除染された地域でのこうした土地被覆の劇的な変化とそれに伴う土砂や放射性セシウムの動きの変化が、下流の生態系にどのような影響を与えたかを総合的に評価することは、環境の持続可能性（Sustainability）の観点からも重要です。

## 研究内容と成果

本研究では、広範囲に農地除染<sup>注2)</sup>が行われた福島県の新田川流域（図1）を対象に、除染された地域での土地利用の変化が、河川の浮遊土砂<sup>注3)</sup>と懸濁態<sup>137Cs</sup> <sup>注4)</sup>の動態に与える影響について、包括的に評価しました。土地被覆については、政府の除染データを用いて除染地域境界の変遷をマップ化しました。また、衛星画像に基づき、これらの地域の植生量を示す正規化植生指標（NDVI）<sup>注5)</sup>を作成し、その変化を追跡しました。河川への影響については、除染期（2013-2016年）と自然修復期（2017-2018年）またがる長期的な現地調査を行い、上流2地点と下流2地点の計4地点で水流と濁度<sup>注6)</sup>（10分の時間分解能）及び懸濁態<sup>137Cs</sup>濃度の変動を継続的に記録しました。

これらのデータとリモートセンシング手法を組み合わせ、上流の除染地域における長期的な土地被覆の変化が、下流の河川環境や太平洋への<sup>137Cs</sup>流出に及ぼす影響を系統的に明らかにしました。

### ・除染地域の土地被覆の変化

新田川流域では上流（野手上）流域の22.9%、下流（原町）流域の11.9%に相当する面積で除染が行われました。除染地域の土地被覆の変化を定量的に推定・比較するため、2011年から2018年にかけて、高い解像度を有するSentinel 2<sup>注7)</sup>と毎日撮影が行われるMODIS<sup>注8)</sup>によって得られる衛星画像を合成し、高解像度・高撮影頻度の衛星画像（ESTARFM画像）<sup>注9)</sup>を作成しました。更に、これに基づき、当該地域の植生量を表すNDVIのマップを作成しました。ドローンで撮影した現地写真との比較などから、NDVIが裸地と植生被覆のある農地の区別に有効であることを確認しました（図2a）。

こうして導いた除染計画地域のNDVIの日変化曲線のピーク値は、2013～2014年にかけては除染前（2012年）と同レベルの値でしたが、2016年には約10%減少しました。2017年には植生の自然回復の影響でピーク値は増加傾向を示しました。

また、政府のデータで2012年（図2c）、2013年（図2d）、2014年（図2e）に除染が予定されていた地域のNDVI変動を解析したところ、その2～3年後にNDVIのピーク値がそれぞれ約12%、11%、15%減少し、除染によって植生被覆が減少する傾向が明瞭に見られました。

また、ESTARFM画像から得られた全てのNDVIマップを対象に、土壌侵食モデル（RUSLE）<sup>注10)</sup>を用いて、土壌の侵食されやすさを示す侵食ポテンシャル<sup>注11)</sup>を計算しました。その結果、除染計画地域全体の侵食ポテンシャルは2016年にピークを迎えたことが分かりました。NDVIは2013年から2016年にかけて減少、2017年から2018年にかけて増加しており、これに対応する結果だといえます（図4）。

## ・河川への土砂の流出と放射性セシウムの濃度変化

2014年8月から2017年3月にかけて新田川下流の原町の懸濁態<sup>137</sup>Cs濃度は急減しました(図5)。

これは、除染後の土壌の<sup>137</sup>Cs濃度が汚染土壌の濃度よりもかなり低いことが影響していると考えられます。懸濁態<sup>137</sup>Cs濃度の低下傾向を周辺の本格的な除染が行われていなかった高瀬川・請戸川と比較すると、新田川においてのみ、大きな濃度低下が認められました。

新田川に特徴的な低い懸濁態<sup>137</sup>Csの濃度を指標として、下流における浮遊土砂がどこからもたらされているか、を推定しました(図6)。これによると、除染初期の2014年から2015年は、除染地からの浮遊土砂はあまり多く河川に流出していなかったのに対し、2016年から2017年にかけては、下流に流出する浮遊土砂の最大80%が除染地域起源であると推定されました。その後2017年から2018年にかけて、除染地域からの浮遊土砂の寄与率が減少し、30%以下の値を取るようになりました。これは、上流域で植生が回復し、侵食ポテンシャルが減少したことが原因だと考えられます。

図7は、同じ洪水条件下での浮遊土砂流出量の時間変化を比較できるように、1年確率洪水流量<sup>注12)</sup>時の浮遊土砂流出量を推定した結果を示しています。これによると、除染期間中に顕著な増加傾向が見られ、2016年には2013年の237.1%となりました。除染後、浮遊土砂流出量は2016年から2017年にかけて約41%激減しており、自然修復期に浮遊土砂の流出が減少していることが分かります。

図8は、2013年から2018年までの新田川流域から太平洋への懸濁態<sup>137</sup>Csの総流出量を計算した結果です。除染中の2015年には大型台風の際には大洪水が起こったため非常に大きな値を取りましたが、全体的には除染前よりも除染後の方が懸濁態<sup>137</sup>Csの総流出量が少し多いように見えます(図8a)。一方、年ごとに台風などの出水が大きく異なることから、その影響を除去するために、1年確率洪水流量時に相当する浮遊土砂量(正規化セシウムフラックス<sup>注13)</sup>)を推定しました(図8b)。すると、2013、2014年の正規化セシウムフラックスと2017、2018年の正規化セシウムフラックスはあまり変わらないことが分かりました。また、除染後、正規化セシウムフラックスは2017年から2018年にかけて約41%激減しており、自然修復による除染地域からの土砂流出の減少が示唆されました。これは、除染により上流からの浮遊土砂は増加するものの、除染地の植生回復が速く土砂流出の増加は短い期間で収まったこと、流出増が除染地からの懸濁態<sup>137</sup>Cs濃度の減少と相殺されたことを示していると考えられます。これらにより、福島においては、除染が河川から海洋への放射性セシウム流出量に与える影響はあまりないことが明らかとなりました。

### 今後の展開

福島の除染は、放射線レベルの低減が最優先課題ですが、大規模な土地改変を伴うため、下流への影響も考慮する必要があります。福島では除染後の土壌の<sup>137</sup>Cs濃度の低下と地域の多雨がもたらした速やかな植生回復の結果、下流への影響は短期的かつ限定的でした。しかし、一方で、大規模な土地改変が、必ずしも下流への影響を低減するとは限らないことを、本研究は示しています。今後、放射性物質を含むさまざまな汚染物質への対策として大規模な土地改変を検討する場合は、地域の植生回復条件を事前に評価したり、適切な緑化対策を準備したりして、下流の持続可能性に与える影響を最小化することが求められます。

- 注1) 放射性セシウム：セシウム (Cs) はアルカリ金属で、ルビジウムやカリウムに似た物理的・化学的性質を持つ。天然に生成するセシウムは安定同位体である  $^{133}\text{Cs}$  であり、環境中の低濃度の岩石、土壌、塵埃中に低濃度で存在しているが、多数の放射性同位体が知られている。このうち、過去の原発事故と 1950 年代後半から 60 年代にかけての大気圏内核実験で生成された主なものが  $^{137}\text{Cs}$  (半減期 30.2 年) と  $^{134}\text{Cs}$  (半減期 2.1 年) である。
- 注2) 農地除染：表面の草を刈った後、表面を浅く (5 cm 程度) 砕土の後、ショベル等の重機を用いて表層土壌を除去するのが一般的な方法である。
- 注3) 浮遊土砂：河川を流下する土砂のうち粒径の細かいシルト・粘土粒子等からなり、河川中を沈降することなく浮遊状態で流下する土砂成分。
- 注4) 懸濁態  $^{137}\text{Cs}$ ：泥や砂などの粒子状の物質に吸着された状態の  $^{137}\text{Cs}$  のこと。
- 注5) 正規化植生指標 (NDVI)：Normalized Difference Vegetation Index の略。可視光赤、および近赤外波長における反射率を用いた植生指数であり、植生の存在域や活性度の評価に用いられる。値は -1 から 1 の間で推移し、値が高いほどその地域の植生量や活性度が高いことを意味する。
- 注6) 濁度：水の濁りの程度。今回は光散乱法のセンサーを用い、福島県のダム湖で採取した標準試料の値により、浮遊砂濃度 (mg/L) に変換した。
- 注7) Sentinel2: 可視光から近赤外にかけて、高い解像度 (10 m/ピクセル) を有する欧州宇宙機関 (ESA) の人工衛星である。
- 注8) MODIS：Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer の略。米航空宇宙局 (NASA) の Terra/Aqua 衛星に搭載されているセンサーで、高い頻度で撮影が行われる。本研究では MOD13Q1 と呼ばれるデータセットを利用した。
- 注9) ESTARFM：Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model の略。Zhu ら (2010) によって開発された衛星画像融合モデル。このモデルによって、高い時間・空間分解能を有する画像の作成を行った。
- 注10) 侵食ポテンシャル：降雨・地面の傾斜・土地被覆等によって決定され、土壌が侵食される可能性を示す。ここでは、RUSLE 式 (注 11 参照) の降雨指標以外の指標を掛け合わせたものとした ( $K \times LS \times C \times P$ )。
- 注11) RUSLE：Revised Universal Soil Loss Equation の略。米国農務省を中心に開発された式である土壌流亡予測式 (USLE) を一部改良したモデル。侵食量 (A) を、降雨係数 (R)、土壌係数 (K)、地形係数 (LS)、作物係数 (C)、保全管理係数 (P) を掛け合わせて求める。
- 注12) 1 年確率洪水流量：平均すると年に 1 度はこの雨量以上の雨が降ると考えられる雨量に対応する河川流量。
- 注13) 正規化セシウムフラックス：各流出イベント中の流量—浮遊土砂濃度曲線 (L-Q 式) を年ごとに作成し、L-Q 式によって 1 年確率洪水流量 ( $Q = 95 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) 時の浮遊土砂濃度を示す。これに浮遊土砂の  $^{137}\text{Cs}$  濃度を掛け合わせたものである

参考図

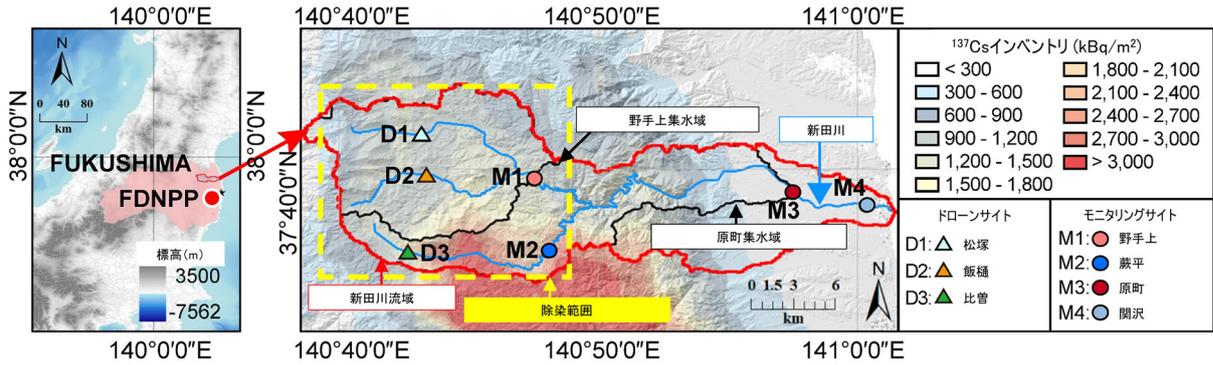


図1 新田川流域における調査地点。<sup>137</sup>CsのインベントリデータはKatoら(2019)から、標高データは国土地理院から取得した。D1-D3がドローンによる調査位置、M1~M4が河川観測地点を示す。

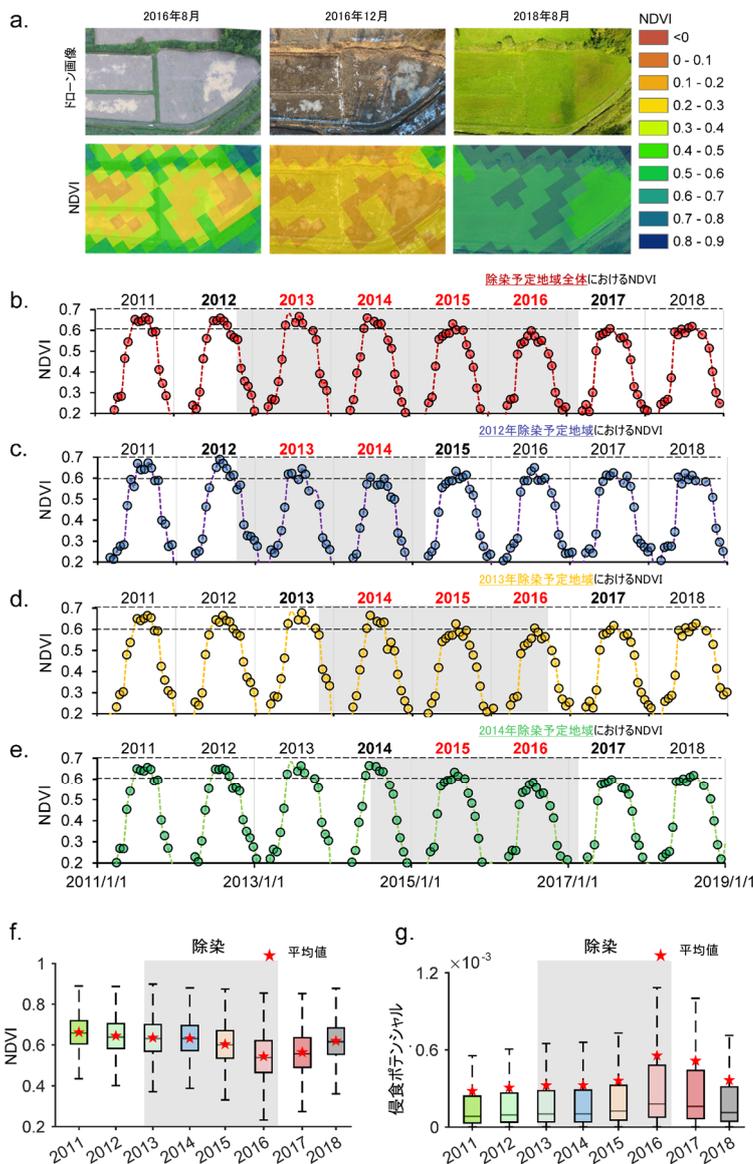


図2 除染地域の土地被覆の変化。(a)比曽(M2)におけるドローン写真と Sentinel2 から得られた NDVI、(b) 全除染地域の NDVI 変動曲線、(c) 2012 年、(d) 2013 年、(e) 2014 年の除染予定地域、灰色の背景は実際に除染が行われた期間、(f) NDVI の時間的変動と (g) 侵食ポテンシャルの 2011 年から 2018 年夏にかけての経時変化。各列はデータ分布を示す。上から順に、最大値・75%・中央値・25%・最小値を表している。

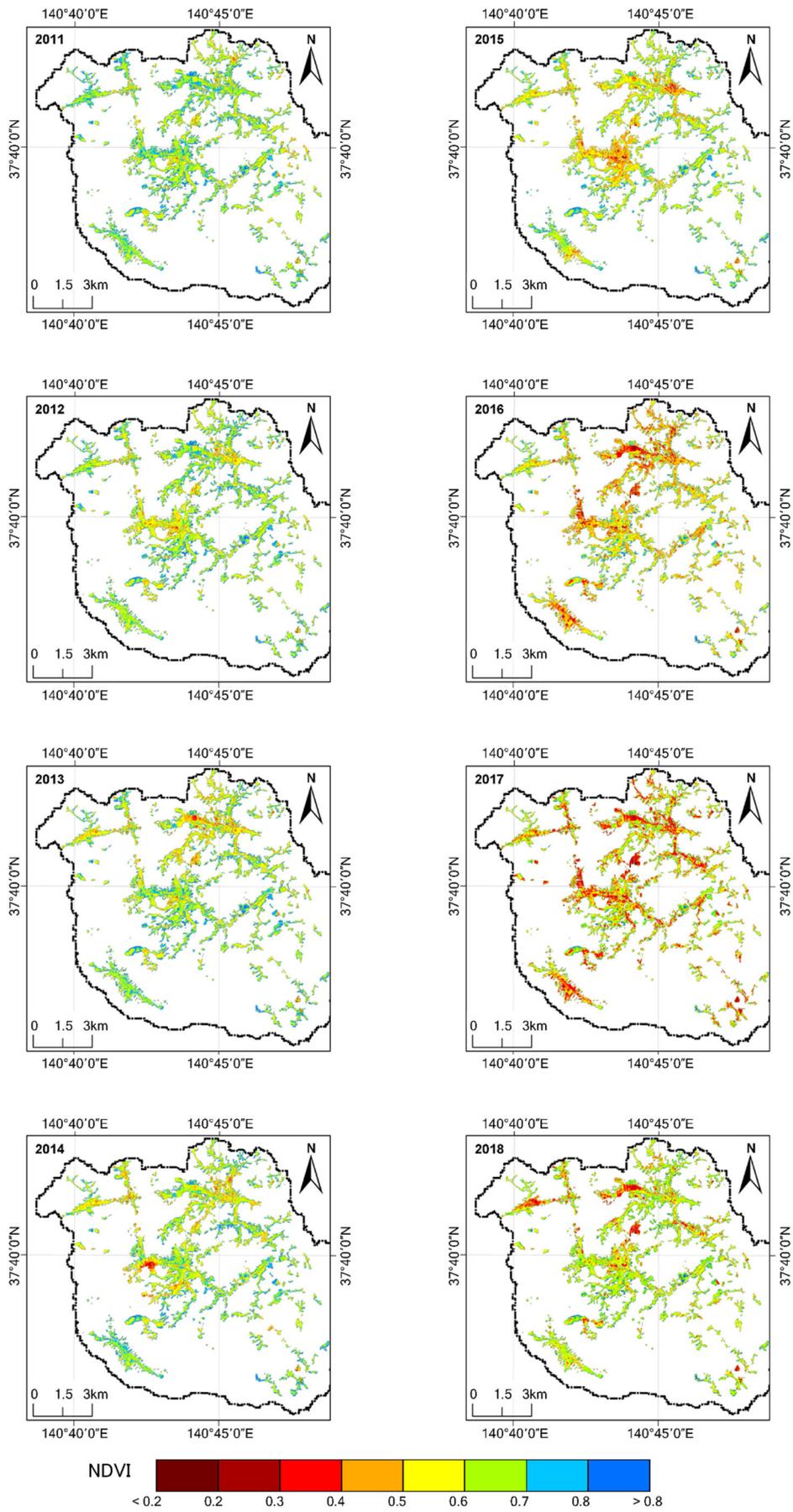


図3 除染予定地域におけるNDVIの経年変化。値が高いほど植生被覆度が高い。

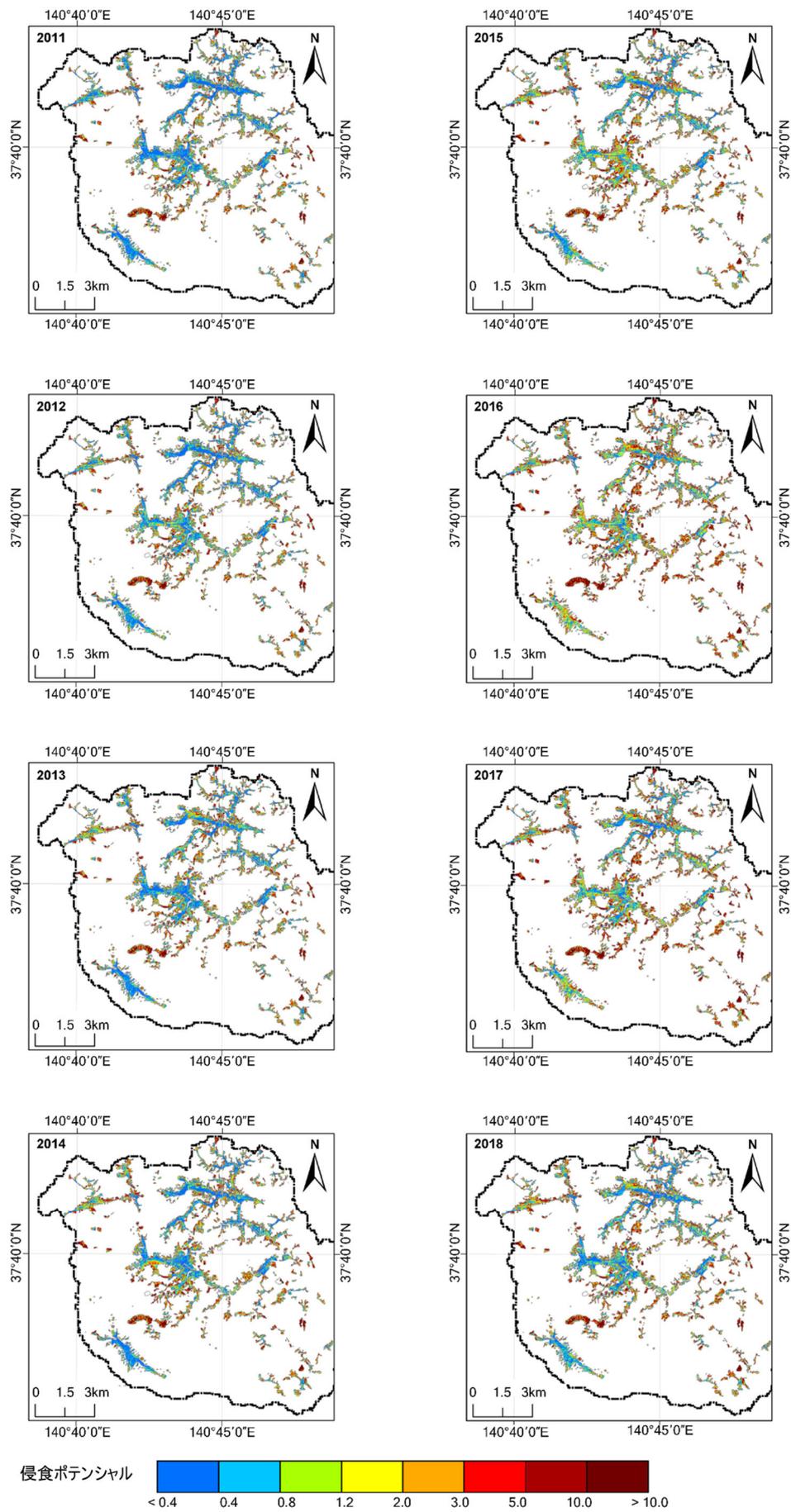


図 4 除染予定地域における侵食ポテンシャルの経年変化。値が高いほど土壌が侵食される可能性が高い。

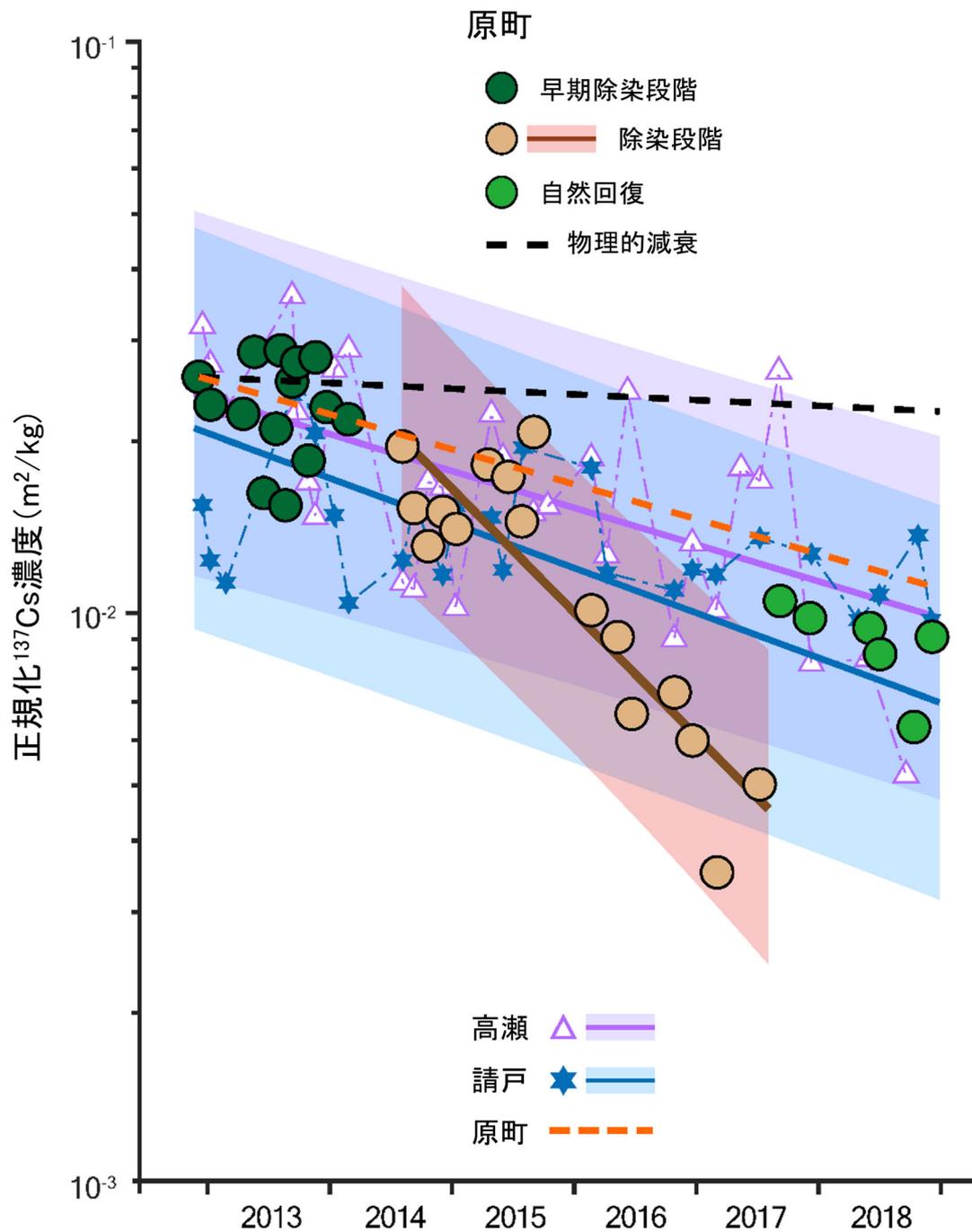


図5 除染が下流の懸濁態<sup>137</sup>Csの流出に与える影響。原町（新田川下流地点）、高瀬（高瀬川下流地点）（ $C_m(t) = 0.031e^{-0.149t}$ ,  $P < 0.001$ ）、請戸（請戸川下流地点）（ $C_m(t) = 0.029e^{-0.182t}$ ,  $P < 0.001$ ）における<sup>137</sup>Cs濃度の時間的変動（ $C_m(t)$ : <sup>137</sup>Csインベントリで正規化したもの）。黒とオレンジの点線は、物理的減衰による<sup>137</sup>Csの減少量と集水域での<sup>137</sup>Csの自然減衰量を示す。

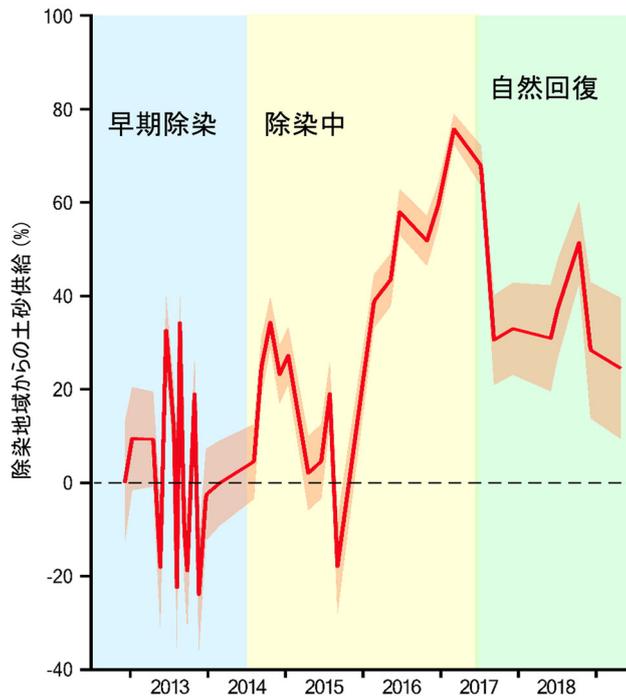


図6 除染地域からの土砂供給(%)。寄与率は混合源モデルにより推定し、自然減衰の $^{137}\text{Cs}$ 濃度 ( $^{137}\text{Cs}$ インベントリで正規化) (請戸と高瀬の $^{137}\text{Cs}$ 濃度の時間変化の平均、 $C_m(t) = 0.033 e^{-0.141t}$ ) と除染土壌の二つを供給源として設定した。

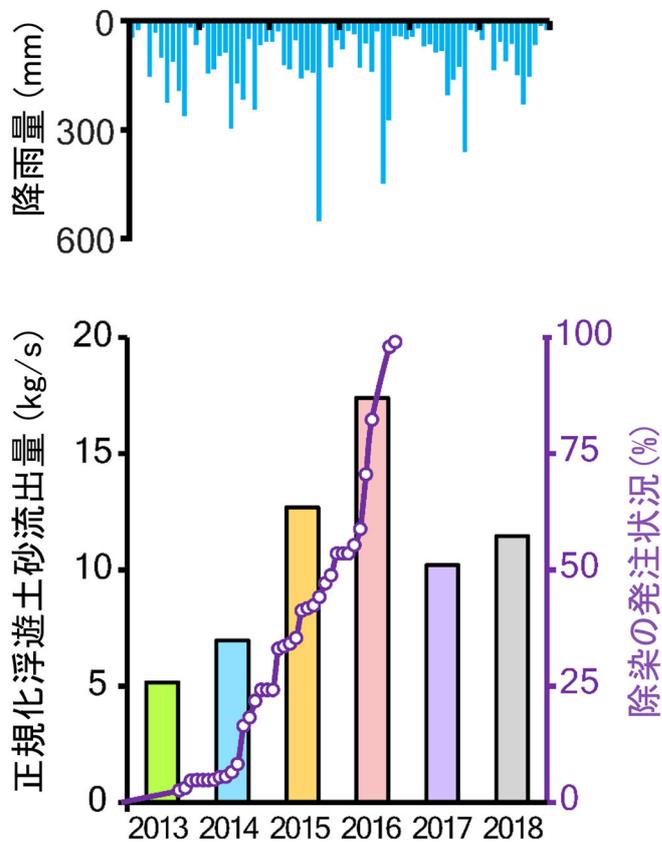


図7 洪水時における1年確率洪水流量 ( $Q = 95 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) 時の浮遊土砂流出量 (正規化浮遊土砂流出量) と除染計画発注状況

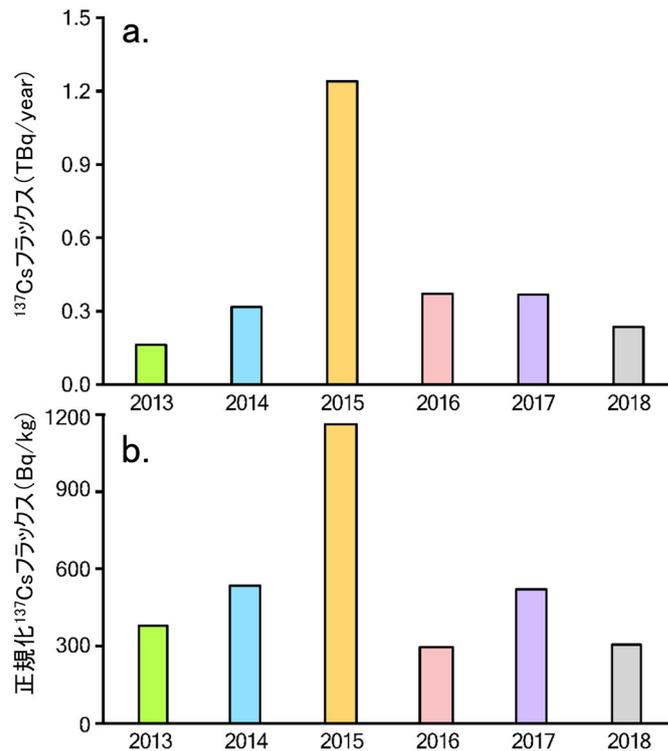


図8 (a)原町から海洋への年間<sup>137</sup>Csフラックスの時間変化、(b)1年確率洪水(SS負荷95 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>)時の正規化<sup>137</sup>Csフラックスの時間変化。

#### 研究資金

本研究は、文部科学省委託研究(2011-2012年度)、原子力規制庁(2013-2014年度)、日本原子力研究開発機構委託研究(2015-2021年度)、科学研究費新学術領域研究24110005、科研費(A)22H00556、フランス国立研究機構、ANR-11-RSNR-0002、科学技術振興機構(JST)ベルモントフォーラムの一環として支援を受けて実施されました。

#### 掲載論文

【題名】: Persistent impact of Fukushima decontamination on soil erosion and suspended sediment (福島原発の除染が土壌侵食と下流の浮遊土砂に与える長期的影響)

【著者名】: Bin Feng, Yuichi Onda\*, Yoshifumi Wakiyama, Keisuke Taniguchi, Asahi Hashimoto, Yupan Zhang

【掲載誌】 Nature Sustainability

【掲載日】 2022年7月14日(現地時間)

【DOI】 10.1038/s41893-022-00924-6

URL: <https://www.nature.com/articles/s41893-022-00924-6>(OPEN ACCESS)

## 問い合わせ先

### 【研究に関すること】

恩田 裕一（おんだ ゆういち）  
筑波大学 生命環境系 教授  
アイソトープ環境動態研究センター センター長  
〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1  
URL: <https://www.ied.tsukuba.ac.jp/~onda/>

脇山 義史（わきやま よしふみ）  
福島大学 環境放射能研究所 准教授  
〒960-1296 福島県福島市金谷川 1 番地  
Email: [wakiyama@ipc.fukushima-u.ac.jp](mailto:wakiyama@ipc.fukushima-u.ac.jp)  
TEL: 024-503-2978

谷口 圭輔（たにぐち けいすけ）  
津山工業高等専門学校 総合理工学科 先進科学系 講師  
〒708-8509 岡山県津山市沼624-1  
Email: [ketanigu@tsuyama-ct.ac.jp](mailto:ketanigu@tsuyama-ct.ac.jp)  
TEL: 0868-24-8186

### 【取材・報道に関すること】

筑波大学広報室  
TEL: 029-853-2040  
E-mail: [kohositu@un.tsukuba.ac.jp](mailto:kohositu@un.tsukuba.ac.jp)

福島大学総務課広報係  
TEL : 024-548-5190  
E-mail: [kouho@adb.fukushima-u.ac.jp](mailto:kouho@adb.fukushima-u.ac.jp)

津山工業高等専門学校  
企画・連携室  
TEL: 0868-24-8220  
E-mail: [rennkei@tsuyama-ct.ac.jp](mailto:rennkei@tsuyama-ct.ac.jp)