

## 福島第一原発事故後の森林生態系で 放射性セシウムの自浄作用効果を解明

東京電力福島第一原子力発電所事故後13年にわたる森林モニタリング調査により、土壌中の放射性セシウムの下方移行という自然のプロセスが、根による放射性セシウム吸収量や空間線量率を低下させる除染効果を持つことを明らかにしました。

福島県の浜通り（太平洋沿岸）では東日本大震災や東京電力福島第一原発事故からの復興へ向けた数多くの取り組みが行われています。一部の森林では落葉かきなどの除染が実施されたものの、同地域の森林の大部分は依然として手付かずのままで、除染を望む市民の声が根強く上がっています。同原発事故から13年以上が経過した現在では、これまで実施されてきた除染方法では放射性セシウム（ $^{137}\text{Cs}$ ）の除去効率が悪く、新たな森林除染方策が求められています。

本研究では、2011年から13年間にわたり、福島県川俣町山木屋地区のスギ林において、落葉落枝層、土壌層及び養分吸収を行うスギの細根（直径0.5 mm以下）の $^{137}\text{Cs}$ 動態を調査しました。その結果、落葉落枝層から土壌層への下方移行が急速に進み、土壌中 $^{137}\text{Cs}$ は時間とともに増加したにもかかわらず、スギ細根中 $^{137}\text{Cs}$ は2020年ごろより減少したことが明らかになりました。特に、細根が密集する土壌0-2cm深での細根中 $^{137}\text{Cs}$ が著しく低下しており、 $^{137}\text{Cs}$ の下方移行によって細根と $^{137}\text{Cs}$ の分布がずれたためであると考えられました。

すなわち、僅か数センチメートルであっても土壌中での $^{137}\text{Cs}$ 下方移行が進むことで、樹木による $^{137}\text{Cs}$ 吸収が減少する効果があり、これは森林生態系の自浄作用とみなすことができます。ここで自浄作用とは、自然のプロセスによって放射性核種の濃度が低下することを指す用語です。チェルノブイリ原子力発電所事故後、河川や海洋など主に水域生態系においては、雨水や流入河川水によって $^{137}\text{Cs}$ が希釈される自浄作用が報告されてきましたが、森林生態系ではほとんど着目されていませんでした。

今回明らかになった森林生態系の自浄作用効果を評価し、新たな森林除染方策として活用していくことは、停滞している浜通りの林業再開へ向けても貢献することが期待されます。

### 研究代表者

筑波大学生命環境系／放射線・アイソトープ地球システム研究センター（CRiES）

高橋 純子 助教

## 研究の背景

東京電力福島第一原子力発電所事故により高濃度の放射性セシウム ( $^{137}\text{Cs}$ )<sup>注1)</sup> で汚染された地域の約70%は森林に覆われています。これらの森林の大部分では除染は行われていません。 $^{137}\text{Cs}$  の森林生態系内での現在の分布状況やその将来変化を把握することは、森林管理を行う上で非常に重要です。

第二次世界大戦後のグローバルフォールアウト<sup>注2)</sup> や1986年のチェルノブイリ原子力発電所事故後の研究により、森林に降下した $^{137}\text{Cs}$  は土壌によって強く吸着され、土壌のごく表層(10~20 cm程度)に長期間とどまることが知られています。一方で、僅かではあるもののその一部は土壌の深部へと下方移行したり、樹木によって吸収され森林生態系内を循環したりするため、森林生態系内の $^{137}\text{Cs}$  動態を予測するモデルが数多く開発されてきました。しかし、樹木根中の $^{137}\text{Cs}$  に関するデータは、その調査・測定の大変さから極めて限られており、このようなデータの欠落が種々のモデル間の誤差を生み出す大きな要因にもなっています。

そこで、本研究では、2011年から2023年にかけて福島県川俣町山木屋地区(旧計画的避難区域)のスギ林においてモニタリングを行い、落葉落枝(リター)層、鉍質土壌層及びスギの細根(直径0.5 mm以下)中の $^{137}\text{Cs}$  濃度を、深さ方向に2 cm間隔という非常に詳細なスケールで調査しました。

## 研究内容と成果

本研究の対象地は福島第一原子力発電所から北西約35 kmに位置する川俣町山木屋地区のスギ林です(図1a)。同地区は2017年3月で避難指示区域の指定が解除されましたが、研究対象となったスギ林は原発事故以降これまで森林管理が行われていません。

本研究では、2011年7月からスクレーパープレート<sup>注3)</sup> (図1b) と呼ばれる土壌採取用具を用いて土壌を5 mm間隔で採取し、ふるい分け(図1c)をしながらスギの根を丁寧に分取しました(図1d)。測定対象としたスギの根は、養分吸収を行う直径0.5 mm以下の細根です。各深度における土壌と細根中の $^{137}\text{Cs}$  濃度を測定することで、以下の成果が得られました。

### ・リター層および土壌中の $^{137}\text{Cs}$ 深度分布の経年変化

図2aに示すように、リター層および土壌中の $^{137}\text{Cs}$  存在量<sup>注4)</sup> は、2017年頃まで時間とともに増加していました。この地点は、航空機モニタリングによって約 $440 \text{ kBq m}^{-2}$  の $^{137}\text{Cs}$  が沈着したと推定されており、原発事故後にスギの樹冠に沈着した $^{137}\text{Cs}$  は、そのほとんどが2017年頃までに落葉や降雨などによって林床に到達したことが分かりました。一方、2020年の高い $^{137}\text{Cs}$  存在量は、スギの幹付近で採取したことによる樹幹流<sup>注5)</sup> の影響であると考えられます。2011年には90%以上の $^{137}\text{Cs}$  がリター層に分布しているのに対し2023年にはその割合は0.2%まで減少しており、 $^{137}\text{Cs}$  はリター層から土壌層へと急速に下方移行していました。さらに、2020年頃からは土壌最表層(0-2 cm)から次表層(2-10 cm)への移行も顕著となっています。一方で、土壌10 cm以深の $^{137}\text{Cs}$  存在量はいずれの年も5%未満であり、依然として表層10 cmの中に沈着した $^{137}\text{Cs}$  の95%以上が保持されていることが明らかとなりました。

### ・スギ細根中の $^{137}\text{Cs}$ 深度分布の経年変化

スギ細根中の $^{137}\text{Cs}$  存在量は、2017年頃まではリターおよび土壌層と同様に増加していましたが、2020年からは減少しています(図2b)。これは、2017年を基準とした時の放射壊変による $^{137}\text{Cs}$  減少よりも大きい減少率で、特に土壌0-2 cm深の細根中の $^{137}\text{Cs}$  が減少していることが分かりました。

その理由を明らかにするために、細根中 $^{137}\text{Cs}$  濃度について種々の相関分析を行ったところ、土壌0-2 cm深の細根中 $^{137}\text{Cs}$  濃度とリター層中の $^{137}\text{Cs}$  濃度の間に高い正の相関があることが分かりました(図

3a)。つまり、リター層中の<sup>137</sup>Cs濃度が時間とともに減少したことを強く反映して、0-2 cm 深の細根中の<sup>137</sup>Cs濃度が減少したと考えられます。一方、0-2 cm 深の細根中<sup>137</sup>Cs濃度と0-2 cm 深の土壌中<sup>137</sup>Cs濃度の間には明瞭な関係は認められなかったものの(図3b)、2-20 cm 深では、細根中<sup>137</sup>Cs濃度と根と同じ深さの土壌中の<sup>137</sup>Cs濃度の間に正の相関が認められています(図3c)。そのため、2-20 cm 深では時間とともに細根中<sup>137</sup>Cs濃度は増加する傾向にありました。

また、今回の調査で対象とした0.5 mm 以下という非常に細い根は表層に集中しており、そのバイオマス<sup>注6)</sup>量は深くなるほど指数関数的に減少することがわかりました。具体的には、0-2 cm 深だけで0-20 cm 深全体の28%を、0-4 cm 深で51%を占めています。そのため、0-2 cm 深の細根中の<sup>137</sup>Cs濃度が低下することは、細根全体の<sup>137</sup>Cs存在量、すなわち<sup>137</sup>Cs吸収量を低下させる効果が非常に高く、反対に2 cm 以深の細根中の<sup>137</sup>Cs濃度が高くなったとしても、細根の量自体が少なくなるため、細根による<sup>137</sup>Cs吸収量は減少します。このことから、僅か数センチメートルでも土壌中で<sup>137</sup>Cs下方移行が進めば、樹木による<sup>137</sup>Cs吸収量が減少することが期待されます(図4)。

### ・森林生態系の自浄作用 (self-cleaning) 効果

本研究チームは、<sup>137</sup>Csの下方移行に伴うこの効果を森林生態系の自浄作用とみなすことを提案します。ここで自浄作用とは、自然のプロセスによって放射性核種の濃度が低下することを指す用語です。チェルノブイリ原子力発電所事故後、河川や海洋など水域生態系において雨水や流入河川水による希釈や拡散などのプロセスで<sup>137</sup>Cs濃度が低下する自浄作用が知られていました。しかしながら、陸域、特に森林生態系ではほとんど着目されてこなかった作用です。僅か数センチメートルでも下方に移行した<sup>137</sup>Csは、細根によって吸収され、また落葉として地表面に戻ってくるという森林生態系の活発な循環から除外されるため、これは自然のプロセスによる除染効果と言えます。

木材中の<sup>137</sup>Cs濃度の経年変化を調べた研究でも、本研究と同様に最初は<sup>137</sup>Cs濃度が増加するものの、次第に<sup>137</sup>Cs濃度が減少することが報告されています。減少に転じる理由として、これまでは木の成長(木材の体積の増加)に伴う<sup>137</sup>Csの希釈や土壌中の<sup>137</sup>Cs固定化の進行が挙げられているのみでした。本研究で明らかになった土壌中の<sup>137</sup>Cs下方移行に伴う<sup>137</sup>Cs吸収量の低減効果は、5 mm 間隔という非常に詳細なモニタリング調査だからこそ発見できたものと考えています。

### 今後の展開

本研究の結果から、土壌中の<sup>137</sup>Cs下方移行という自然のプロセスによって細根による<sup>137</sup>Cs吸収量の減少が促進されていることが明らかとなりました。土壌自体に放射線を遮蔽する能力があることから、僅か数センチメートルでも<sup>137</sup>Csの下方移行が進むことで、森林内の空間線量率も大きく下がることが分かっています。

このように、<sup>137</sup>Cs下方移行の除染効果は非常に高いことが期待されますが、帰還困難区域・旧避難指示区域の森林を何もしないで放置することが良いというわけではありません。植林地が管理放棄されると、密になった樹冠が閉じて林内に光が届かなくなるため下草が衰退し、森林下流域に<sup>137</sup>Csを流出させる土砂侵食のリスクが高まることが知られています。一方、間伐などの適切な森林管理を行うことで、樹冠が開け、林内に到達する雨と日射量が増加します。これは、リターや土壌有機物の分解を促進し、降雨の浸透によって<sup>137</sup>Csの下方移行を促進する効果があることが予想されます。

今後は、間伐によって<sup>137</sup>Csの下方移行が促進されるかどうかを検証し、この自浄作用効果を活用した新たな森林除染方策の提案を目指します。

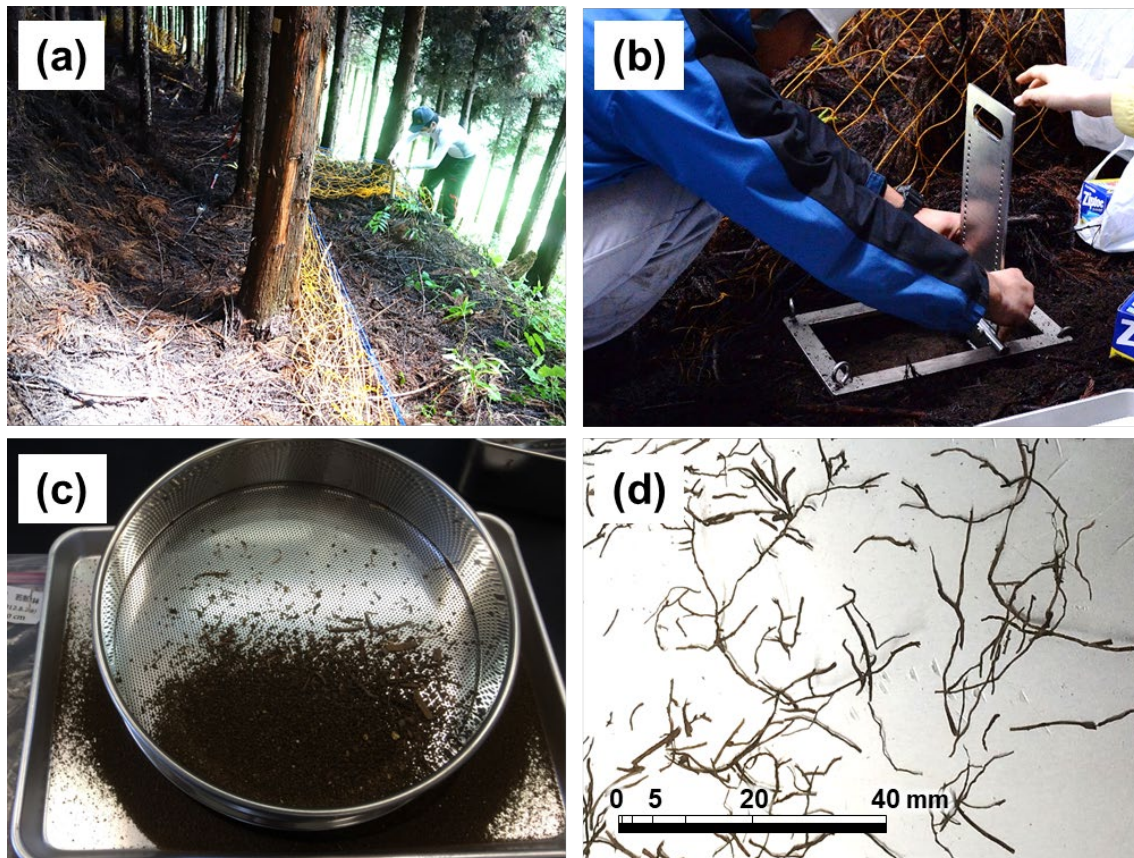
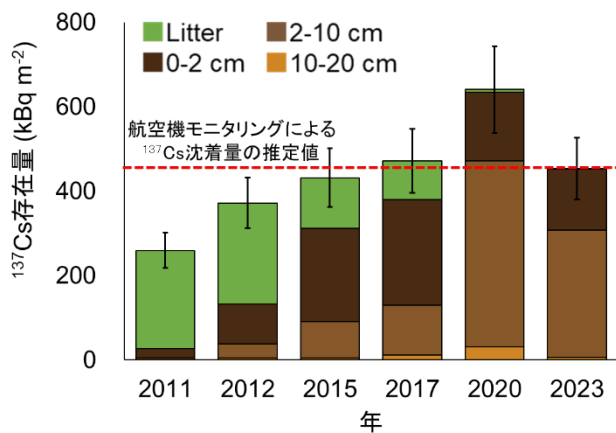


図1 調査対象地および研究手法

(a)研究対象スギ林、(b)スクレーパープレートによるサンプリング、  
(c)土壌試料のふるい分け、(d)スギ細根サンプル

(a) リター層および土壌層



(b) スギ細根

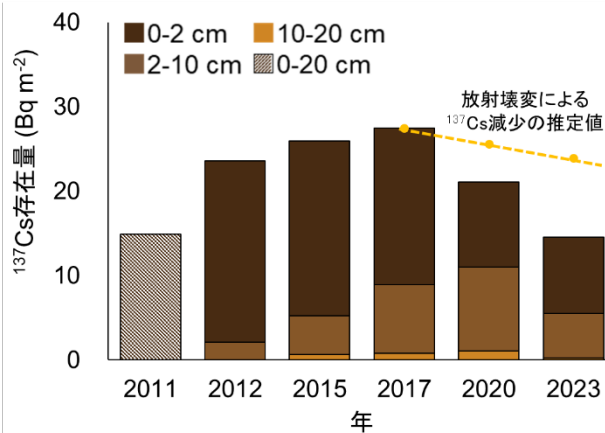


図2 (a)リター層および土壌層の <sup>137</sup>Cs 深度分布の経年変化  
(b) スギ細根中の <sup>137</sup>Cs 深度分布の経年変化

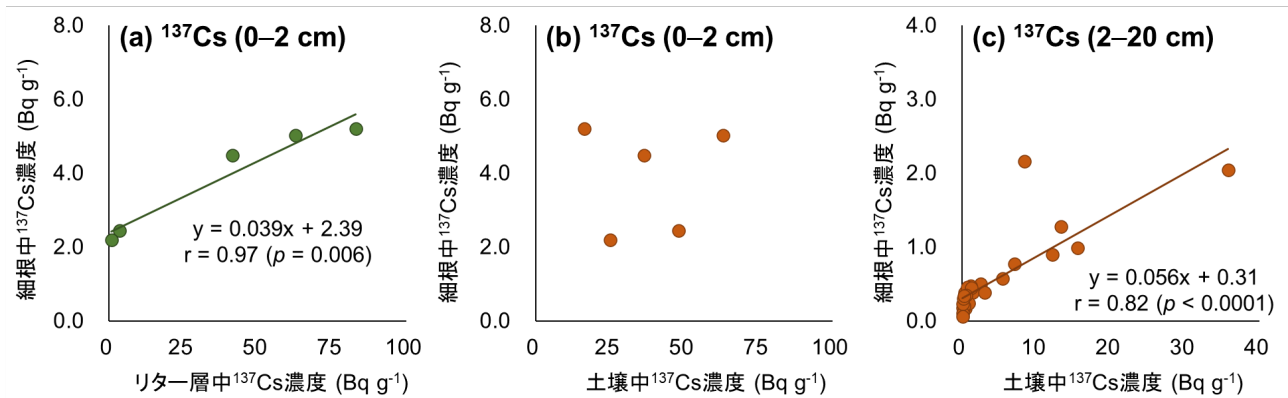


図3 (a)0-2 cm 深における細根中  $^{137}\text{Cs}$  濃度とリター層中  $^{137}\text{Cs}$  濃度の関係  
 (b)0-2 cm 深における細根中  $^{137}\text{Cs}$  濃度と土壌中  $^{137}\text{Cs}$  濃度の関係  
 (c)2-20 cm 深における細根中  $^{137}\text{Cs}$  濃度と土壌中  $^{137}\text{Cs}$  濃度の関係

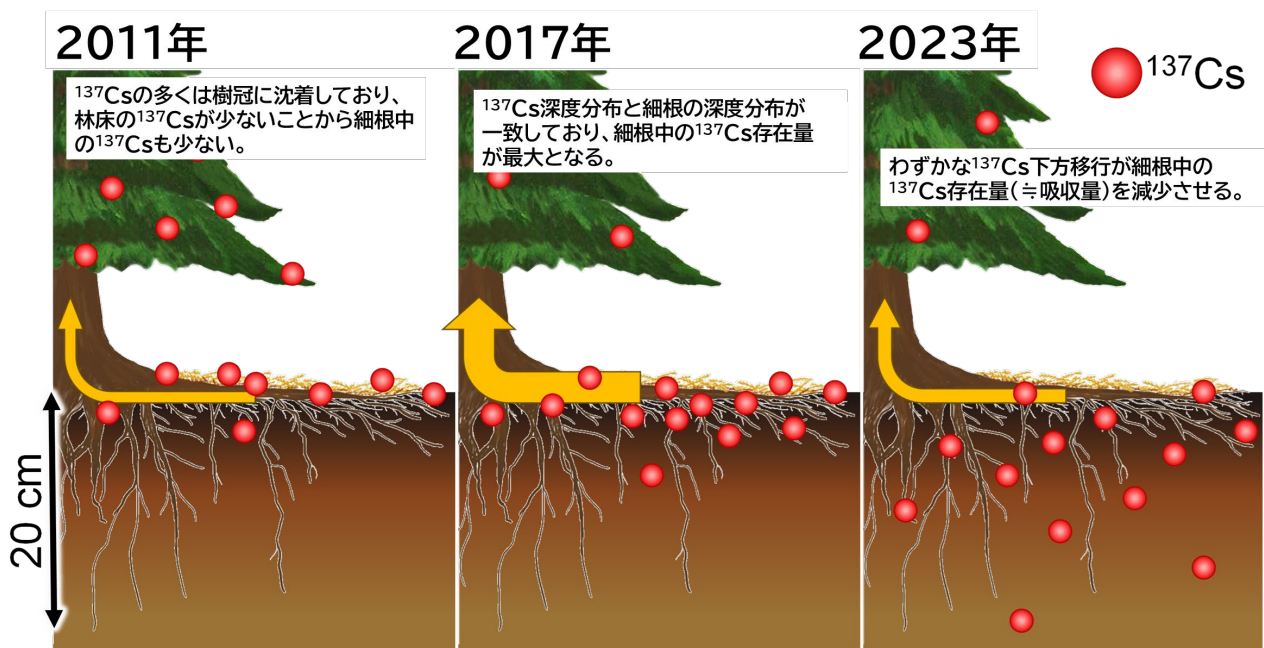


図4  $^{137}\text{Cs}$  下方移行による自浄作用効果の概念図

## 用語解説

- 注1) 放射性セシウム：原子力発電所で用いられている濃縮ウラン（ウラン 235）の核分裂によって生成される人工放射性同位体。このうち、質量数が 137 のものがセシウム 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) であり、福島第一原子力発電所事故による放出量が多く、半減期も約 30 年と比較的長いことから、環境や人体への長期的な影響が問題となる。
- 注2) グローバルフォールアウト：1950 年代から 1960 年代前半をピークに実施された多くの大気圏核実験により生成され、北半球を中心に地球全域に拡散・降下した放射性降下物のこと。1963 年の部分的核実験禁止条約締結により大気圏核実験が禁止され、1960 年代後半にはその降下量は急速に減少したものの、半減期の長いセシウム 137 やストロンチウム 90 は現在でも残存している。
- 注3) スクレーパープレート：15 cm×30 cm の金属フレームで規定された範囲の土壌を表層から順に薄く削り取るための採取用具。スクレーパー（金属ヘラ）に 5 mm 間隔で採取深度を調節できる穴が開いており、5 mm 間隔の任意の厚さで土壌を正確に採取できる。
- 注4)  $^{137}\text{Cs}$  存在量：ある空間に存在する  $^{137}\text{Cs}$  の量。土壌の  $^{137}\text{Cs}$  存在量は、土壌の  $^{137}\text{Cs}$  濃度 ( $^{137}\text{Cs}$  の量をその土壌の質量で割った値) にその土壌の単位体積当たり（本研究では 20 cm 深まで）の質量を乗じることで求められる。土壌の  $^{137}\text{Cs}$  濃度は採取深度によって異なる値となるが、土壌 20 cm 以深にはほとんど  $^{137}\text{Cs}$  が存在していないため、土壌 20 cm 深までの  $^{137}\text{Cs}$  存在量は、その地域に沈着した  $^{137}\text{Cs}$  量とみなすことができる。
- 注5) 樹幹流：森林に降る雨のうち、樹木の幹を伝って林床に到達する雨水。幹の太さや立木密度によって変動するものの、降雨全体の約 5~20% を占める。そのため、幹の付近には雨水に含まれていた成分が集中することが知られている。
- 注6) ある空間に存在する生物（バイオ）の量を、質量（マス）として表したものの。

## 研究資金

本研究は、文部科学省委託研究（2011-2012 年度）、原子力規制庁委託研究（2013-2014 年度）、日本原子力研究開発機構委託研究（2015-2021 年度）、科研費（若手研究）20K19951、科学技術振興機構（JST）ベルモントフォーラム（ABRESO）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】 Downward migration of  $^{137}\text{Cs}$  promotes self-cleaning of forest ecosystem by reducing root uptake of Japanese cedar in Fukushima.

( $^{137}\text{Cs}$  の下方移行は福島のスギの経根吸収減少によって森林生態系の自浄作用を促進する)

【著者名】 Junko Takahashi (高橋 純子)<sup>1\*</sup>, Satoshi Iguchi (井口 啓)<sup>2</sup>, Takuya Sasaki (佐々木 拓哉)<sup>3</sup>, Yuichi Onda (恩田 裕一)<sup>1</sup>

1. 筑波大学生命環境系／放射線・アイソトープ地球システム研究センター (CRIES)

2. 筑波大学理工情報生命学術院生命地球科学研究群地球科学学位プログラム

3. 筑波大学生命環境学群地球学類

※責任著者

【掲載誌】 Science of the Total Environment

【掲載日】 2024 年 6 月 14 日（オンライン先行公開）

【DOI】 10.1016/j.scitotenv.2024.174010

問合わせ先

【研究に関すること】

高橋 純子（たかはし じゅんこ）

筑波大学生命環境系／放射線・アイソトープ地球システム研究センター（CRiES） 助教

〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報局

TEL: 029-853-2040

E-mail: kohositu@un.tsukuba.ac.jp