

## 降雨による空間放射線量率の変化を説明するモデルを開発

2011年の福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性核種が、福島県の森林で空間線量率（時間当たりの放射線量）の上昇を引き起こしました。物理的減衰や除染により、長期的には順調に減少していますが、降雨後に低下したり乾燥時には上昇したりするなど、空間線量率の一時的な変化もみられ、地域住民の不安にもつながっていました。

降雨後の空間線量率の低下は、土壌水分量が増えることで放射線の遮蔽効果が高まるためと予想されていましたが、空間線量率に対する土壌水分の影響を定量化した研究はこれまでありませんでした。

本研究では、土壌水分量と空間線量率を現地で観測し、降雨による空間線量率の変化を推定するモデルを開発しました。土壌水分データがない場合でも推定が可能な手法です。

観測は福島県内の二地域（浪江町および川内村）で実施しました。浪江町では土壌水分の増加とともに空間線量率が減少し、その変化を降雨量から説明できました。川内村でも、実効雨量から土壌水分の推定が可能でした。空間線量率では、ばらつきが大きいものの変動傾向は推定できました。

この手法は、降雨の影響を除去して空間線量率の長期減少傾向を正確に定量化すること役立ち、福島県の環境がどれくらい回復しているかについての正確な評価につながることで期待されます。

### 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）

恩田 裕一 教授

## 研究の背景

空間線量率<sup>注1)</sup>は、環境中の特定の場所の放射線量の値としてよく使われます。2011年3月の福島第一原子力発電所の事故で放出された放射性セシウム ( $^{137}\text{Cs}$ )<sup>注2)</sup>は森林にも沈着し、空間線量率が上昇しました。物理的減衰や除染により長期的には順調に減少していますが、降雨後には空間線量率が一時的に低下する一方、乾燥時には上昇がみられ、土壌水分による放射線の遮蔽効果が影響していると予想されていました。しかし、空間線量率に対する土壌水分の影響を定量化した研究はこれまでありませんでした。

土壌内の水分が増加すると、核放射線に対する実効的な被ばく量を減少させます。従って、降雨や降雪による土壌水分量の変化が空間線量率を変動させる重要な要素になります。

福島県の森林における空間線量率の変化を評価するためには、 $^{137}\text{Cs}$ の沈着や移動だけでなく、降雨や土壌水分量などを考慮する必要があります。ただし、現地での土壌水分データ測定には労力やコストがかかります。このため、本研究では、降雨データから算出可能な実効雨量<sup>注3)</sup>で土壌水分量を代替できるかどうかを検討しました。

## 研究内容と成果

本研究ではまず、土壌水分量の変化と空間線量率の関係を調べるため、福島県の二地域の山林で観測を行いました(図1)。空間線量率が $5.0 \mu\text{Sv/h}$ を超える浪江町の森林内(2021年)と、除染が実施され空間線量率が $1.0 \mu\text{Sv/h}$ を下回る川内村の森林(2019年)です。

現地で土壌水分量と空間線量率の1時間データを測定し、土壌水分量の変化と空間線量率の変化との関係を調べました。次に、気象庁の降雨量データを用いて実効雨量を算出し、現地で観測された土壌水分量と比較しました。さらに、実効雨量と空間線量率との関係も調査しました。これらの比較結果を基に土壌水分量を実効雨量で代替し、最終的に空間線量率を推定しました。

### ・土壌水分量と空間線量率の変化(浪江町)

2021年5~7月の浪江町では、土壌水分量の増加に伴い空間線量率が低下していました。高い負の相関を示す(相関係数は-0.91)比例関係にありました。このため、土壌水分量の変化が空間線量率の変化には重要であり、土壌水分量の変化から空間線量率の推定が可能となりました(式1)。

$$z(t) = -0.179y(t) + 11.653 \quad (\text{式1})$$

$z(t)$ は時刻  $t$  の時の空間線量率、 $y(t)$ は時刻  $t$  の土壌含水率を表す。

### ・実効雨量と土壌水分量の関係(浪江町)

実効雨量の算出には、土壌中の水分量が半分になる期間(半減期)を決定する必要があります。さまざまな半減期と土壌水分量の関係を調査した結果、半減期が2時間の短期実効雨量; $r_w$ を20%、半減期が7日間の長期実効雨量; $R_w$ を80%として算出した新たな実効雨量; $R_w'$ が、土壌水分量の観測結果と高い相関を示しました。ただし、実効雨量の吸水過程と排水過程では、ヒステリシス<sup>注4)</sup>が存在することが観察されました。そのため、吸水過程と排水過程の観測値を区別し、より精緻に推定する必要があります。本研究では、実効雨量と土壌水分量の変化率を示す指標 $\alpha = (R_w' \text{ の変化量; } \pm R_w') / (\text{土壌水分量の変化量; } \pm y(t))$ について、吸水過程と排水過程の違いを調査しました。

吸水過程では、各降雨イベントの $\pm R_w'$ が増加するにつれて $\alpha$ は累乗関数的に減少していました。排水過程では、ほとんどの降雨イベントにおいて降雨終了直後の $\alpha$ は大きく、時間が経過するにつれて小さくなりました。これらで求めた $\alpha$ を用いて実効雨量から土壌水分量を表し、求めた土壌水分量を(式1)に代入することで空間線量率を推定しました。その結果、土壌水分量から推定した空間線量率と実効雨量から推定した空間線量率に大きな違いはなく、いずれも相関係数が-0.80を超える強い相関を示しました。

・川内村における空間線量率の推定

川内村でも浪江町と同様の推定が可能かどうかを検証しました。川内村の空間線量率は、落葉除去や皆伐のため、浪江町の空間線量率よりも一桁以上低くなっています。そこで、空間線量率の低い地域でも、土壌水分量の変化から空間線量率を推定できるかどうかを検証しました。その結果、土壌水分量との相関係数は 0.84 でした（式 2）。

$$z(t) = -0.0025y(t) + 0.3327 \quad (\text{式 2})$$

一方、実効雨量を用いて推定した空間線量率と現地観測した空間線量率の相関係数は-0.57 でした。なお、撥水性<sup>注5)</sup>が存在する際の  $\alpha$  値は別途考量する必要があるため、さらなる検討が必要になります。

今後の展開

本研究により、土壌水分量の変化が空間線量率の変化に影響を与える重要な要因であることが確認されました。今後の研究では地表面における  $^{137}\text{Cs}$  の存在量や撥水性を評価する必要があります。また、本研究では夏データ（5～7月）を用いましたが、夏と冬では日射量や気温の影響が異なり、土壌水分量の変化量も異なります。このため、今後の空間線量率を推定するには年間を通した観測が必要になります。

本研究では、降雨に伴う空間線量率の低下を推定するモデルを開発しました。この手法は、空間線量率の一時的な変化が降雨以外の影響によって生じているかどうかを判断する指標として用いることができます。降雨の影響を除去して空間線量率の長期減少傾向を正確に定量化することに役立ち、福島環境がどれくらい回復しているかについての正確な評価につながると期待されます。また、この手法を用いれば、空間線量率の変化から降雨の有無や土壌水分量の変化をある程度推定することも可能になります。

参考図



図1 研究の概要図

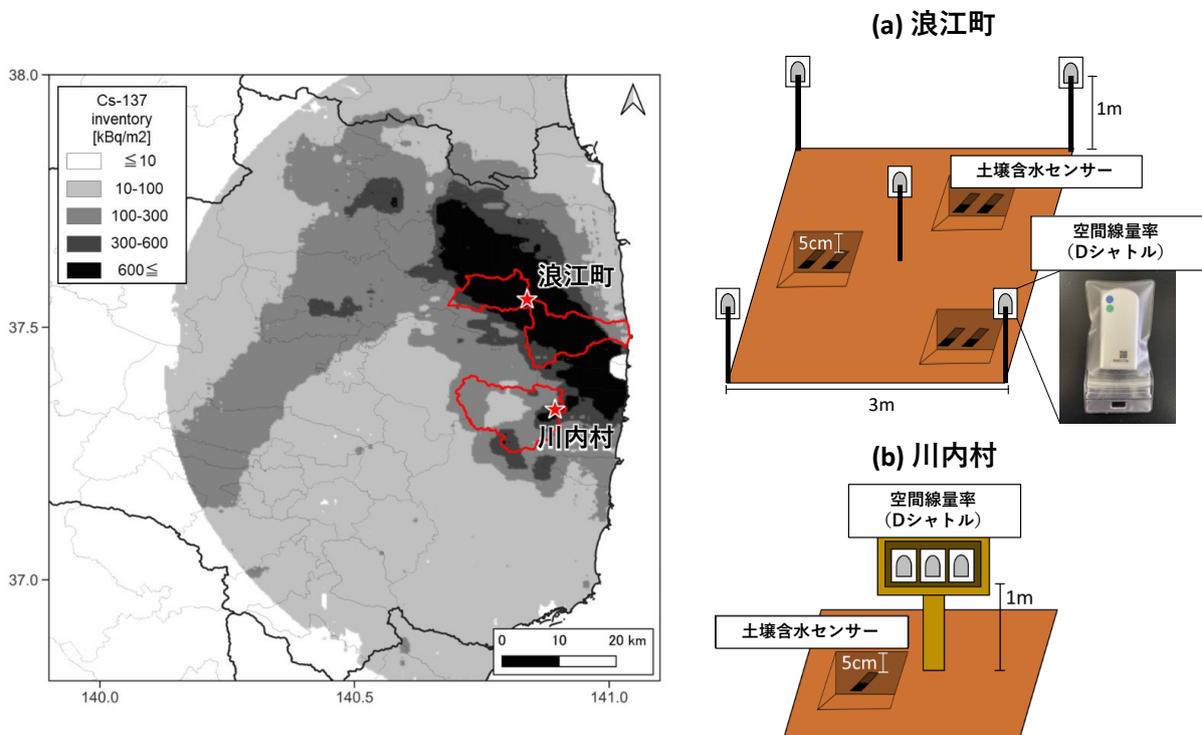
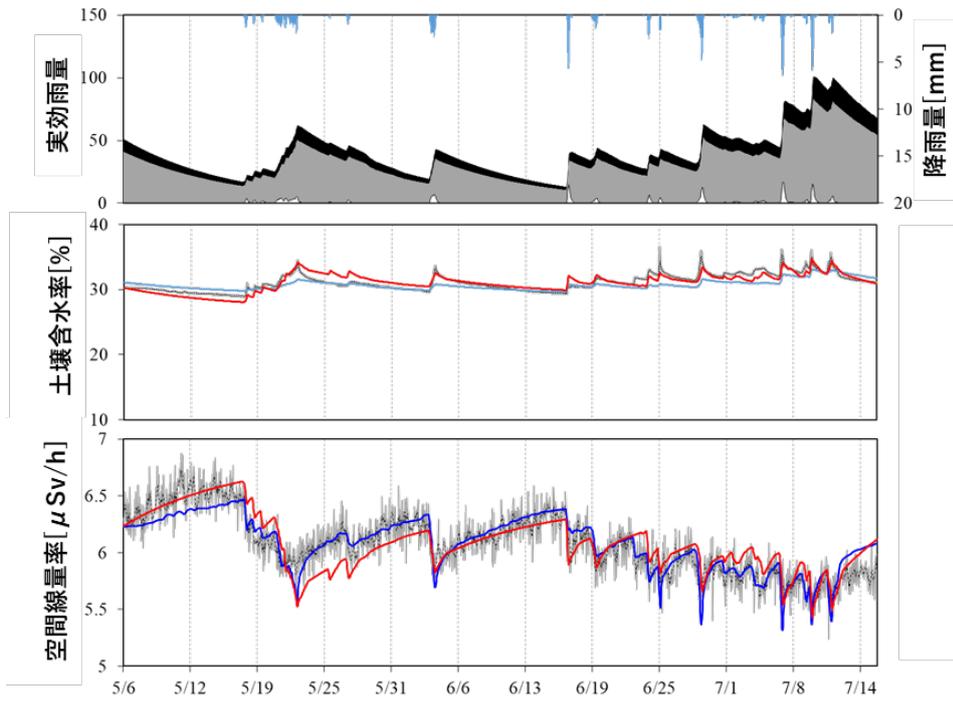


図2 研究地域（背景は<sup>137</sup>Cs 沈着量 (Bq/m<sup>2</sup>)）及び観測機器設置状況

(a) 浪江町



(b) 川内村

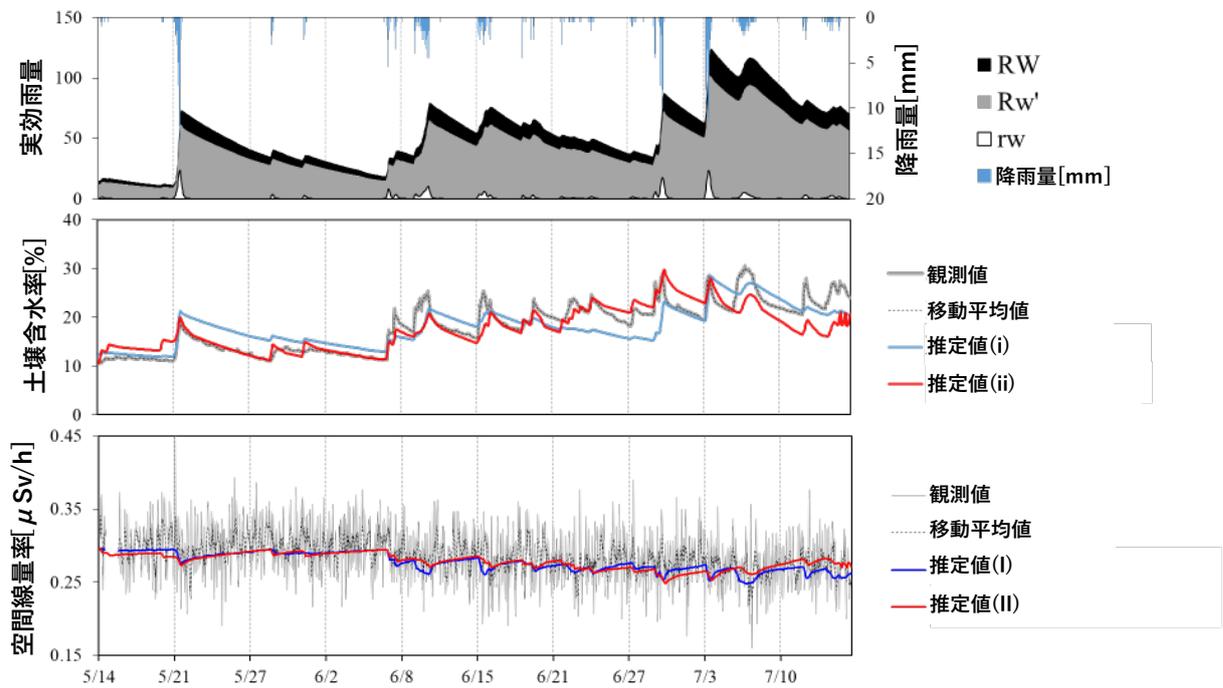


図3 上から実効雨量、土壌水分量、空間線量率の時系列変化である。推定値(i) は  $Rw'$  を用いた推定値、推定値(ii) は  $\alpha$  を用いた土壌水分量の推定結果である。推定値(I) は現地観測された土壌水分量を用いた推定値(式1及び式2)、推定値(II) は推定値(ii) を用いて算出した土壌水分量から推定した値である。

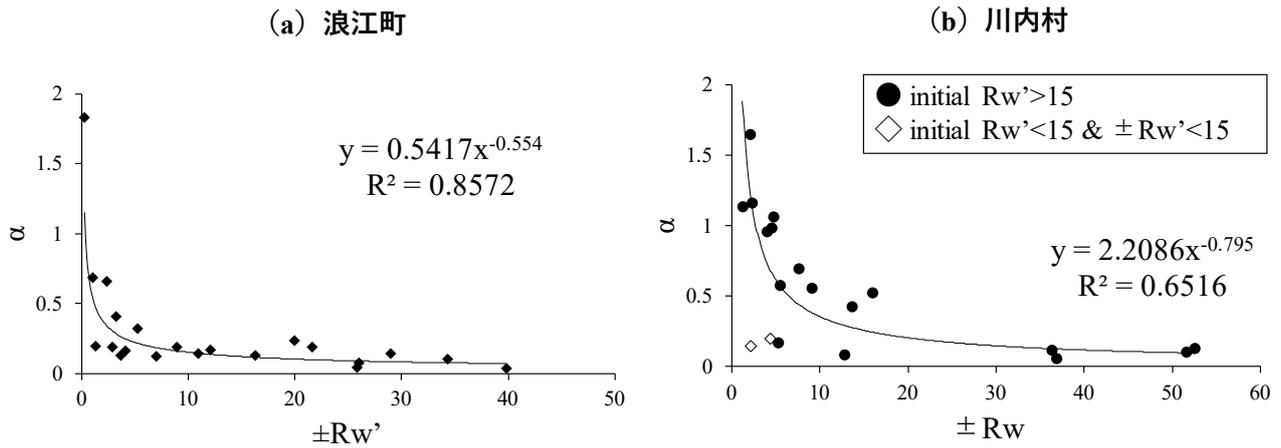


図4 αと降雨イベント時の実効雨量の変化量 ( ±Rw' )

### 用語解説

- 注1) 空間線量率 ここでは単位時間当たりの空間中のγ (ガンマ) 線量を測定したもの  
 (参照：環境省\_放射線による健康影響等に関するポータルサイト④ 空間線量率の測定方法  
[https://www.env.go.jp/chemi/rhm/portal/digest/dwelling/detail\\_004.html](https://www.env.go.jp/chemi/rhm/portal/digest/dwelling/detail_004.html))
- 注2) 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 <sup>133</sup>Cs で、環境中の岩石、土壌、塵埃中に低濃度で存在している。また、多くの放射性同位体が知られており、過去の原発事故で放出されたり 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りした主なものが <sup>137</sup>Cs (半減期 30.2 年) である。
- 注3) 実効雨量 (Rw) 過去の降雨の影響を時間とともに減少させて積算した降雨量の指標で、下記の式で算出される。R<sub>0</sub> ; t=0 の時の降雨量[mm/h]、R<sub>n</sub> ; 時刻 t=0 より n 時間前の降雨量[mm/h]、T は土壌の水分量が半分になる期間 (半減期) である。本研究では、降雨量を気象庁の時間降雨量データから取得している。

$$Rw = R_0 + AR_1 + A^2R_2 + A^3R_3 + \dots + A^nR_n$$

$$A = 0.5^{1/T}$$

- 注4) ヒステリシス 土壌水分ヒステリシス。土壌中の水分含有量と土壌水ポテンシャル (水分のエネルギー状態を表す指標) の関係が、水分の増加時と減少時とで異なることを指す。つまり、同じ土壌水分量でも、水分の増加過程と減少過程とでは土壌水ポテンシャルが異なる値を示す現象である。
- 注5) 撥水性 水をはじく性質。土壌の含水率の増加とともに強くなるが、ある含水率で最大となり、さらに含水率が増えて一定の値に達すると消滅する。

### 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支援を受けて実施されました。

## 掲載論文

【題名】 Changes in air dose rates due to soil moisture content in the Fukushima prefecture forests.  
(福島県の森林における土壌含水率の変化による空間線量率の変化)

【著者名】 Miyu Nakanishi (中西美夕)<sup>1</sup>, Yuichi Onda (恩田裕一)<sup>2\*</sup>, Junko Takahashi (高橋純子)<sup>2</sup>, Hiroaki Kato (加藤弘亮)<sup>2</sup>, Hikaru Iida (飯田光)<sup>1</sup>, Momo Takada (高田モモ)<sup>3</sup>

1. 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
2. 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)
3. 国立研究開発法人産業技術総合研究所

※責任著者

【掲載誌】 Environmental Pollution

【掲載日】 2023年7月8日 (オンライン先行公開)

【DOI】 <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122147>

## 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／放射線・アイソトープ地球システム研究センター (CRIES) センター長  
〒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