

福島県の森林における降雨前後の土壌含水率の変化による空間線量率の変化

中西 美夕*¹
Nakanishi Miyu

恩田 裕一*²
Onda Yuichi

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所（FDNPP）事故により放出された¹³⁷Csによって、福島県内の森林内の空間線量率は上昇した¹⁾。福島県内の空間線量率は年月を経て減少しているが、減少スピードは土地利用ごとに異なっており、その中でも森林域は減少スピードが遅い。森林面積は広大であり、すべての森林において除染等を実施することは現実的に困難であり²⁾、今後、長期間にわたって森林における放射性物質の動態や空間線量率の変化を監視していく必要がある。

森林内の空間線量率は森林除染や間伐等により減少することが分かってきているが、降雨による一時的な変化も発生している。一般的に、降雨時は、湿潤沈着した²²²Rnの崩壊生成物が線量率の増加に寄与するため、空間線量率が増加すると言われているが³⁾、FDNPP事故の影響を受けた森林では、降雨時に空間線量率が一時的に低下することが知られている。その要因が土壌水分の増加である。土壌水分の増加は、土壌のかさ密度に影響を与え、空間線量率を減衰させる⁴⁾。したがって、FDNPP事故の影響を受けた森林における空間線量率を評価するためには、降雨や土壌含水率の変化による空間線量率の変化を把握する必要がある。そのために、現地での土壌含水率及び空間線量率の観測が必要となる。ただし、現地での土壌含水率の観測には、コストや労力がかかるため、降雨量データによって算出できる実効雨量を使用して、土壌の水分状況を把握できないかと考えた。

本稿では、福島県内の2つの森林を対象に、土壌含水率と空間線量率の変化の要因を明らかにし、土壌含水率の変化によって空間線量率の変化の推定を試みる。加えて、実効雨量を使用した空間線量率の変化を把握することは可能かどうかについて概説する。

2. 調査地域と方法

福島県にある2つの森林を対象に現地観測を実施した（図1）。1つ目は、福島県双葉郡浪江町赤宇木地区にあるスギ林である。この地域はFDNPPから北西約23 kmに位置しており、2011年7月2日時点の沈着量は4727 kBq/m²であった。本研究では、スギ若齢林にプロットを設けて観測を実施した。対象のスギ林において立木密度は3300本/ha、平均

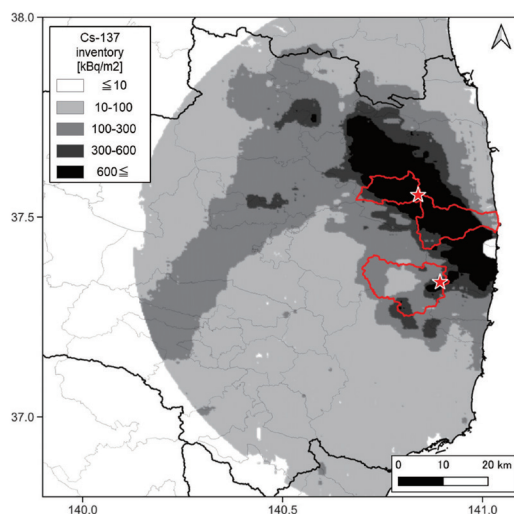


図1 赤い星印は研究地域、赤線は行政界を示す

樹高は 18 m, 平均開空度は 31.5% であった。土壌は固相率 12%, 液相率 33%, 気相率 56% (気相の内訳は粗孔隙 34%, 細孔隙 54%) であり, 年間を通して湿潤な土壌である。2 つ目の対象地域は, 福島県双葉郡川内村下川内字鍋倉地内に所在する福島県林業研究センター川内試験林のスギ林である。このサイトは, 事故後の 2012 年から林野庁で実施している長期モニタリング調査のサイトである。森林は 2012 年時点で, 樹齢 43 年のスギ林, 平均斜度は 34 度, 放射性セシウムの沈着量は, 1120 kBq/m² で, 2012 年 11 月時点での空間線量率は 2.2~4.5 μSv/h であった。その後, 2012 年 11~12 月にかけて落葉除去を実施し, 2012 年 11~12 月にかけて皆伐作業を行い, スギを 3000 本/ha 植栽した。2019 年時点では, 樹齢 7 年のスギ林で, 樹高は 2~3 m 前後である。このサイトの空間線量率は植栽後にも低下傾向が続き, 皆伐作業後から 2019 年までに約 50% 低下し, 現在の空間線量率は 0.30 μSv/h 前後となっている。また土壌は, 固相 27%, 液相 30%, 気相 43% (気相の内訳は粗孔隙 24%, 細孔隙 54%) であった。なお, 研究対象地域におけるバックグラウンドの吸収線量率は, Sanada ら⁵⁾ のマップによると, 0.0045 μGy/h~0.09 μGy/h の範囲であった。

研究方法に関して, 降雨が空間線量率の変動に与える影響を確認するため, 簡易的に連続的に記録できる機器を使用した観測を以下のように実施した。浪江町では, 2021 年 5 月 6 日~2021 年 7 月 15 日までの 71 日間にかけて観測を行った。サイト内に約 3 m × 3 m の調査プロットを作成し, 土壌含水率計 (Oneset 社, S-SMD-005) を深度 5 cm に設置し, 1 時間ごとに測定した。空間線量率は, 線量計 D シャトル (千代田テクノ社) を調査プロットの角 4 か所と中心部分に 1 m の高さで計 5 台設置した。空間線量率の値は, 1 時間のカウント値から算定した値を用いた。川内村の調査は, 浪江町と同様の季節を選択し, 2019 年 5 月 1 日~7 月 16 日までの 77 日間で観測した結果を用いた。土壌含水率については, ADR 土壌水分計 (ウイジン, UIR-SM-2X) を 1 台, センサーを土壌の深さ約 5 cm に設置し, 1 時間ごとの体積含水率の測定・記録を行った。また, 空間線量率は D シャトル (千代田テクノ社) を 1 か所に設置した高さ約 1 m の収納箱内に, 3 台設置し, 1 時間のカウント値から算定した値を用いた。

しかし現地での観測は, コスト及び労力がかかることに加えて, 局所的なデータは示すことができるが, 観測したその特定の場所のデータしか示さない。そこで本研究では, 過去の降雨の影響を時間的に減少させることで算出される降雨の指数である実効雨量を用いた。1 日の降雨量データから得られる実効雨量値と土壌含水率の変化には高い相関があることが分かっている⁶⁾。実効雨量は式(1)で表される。

$$R_w = R_t + \sum_{n=1}^x \{R_{(t-n)} \cdot 0.5^{\frac{n}{T}}\} \quad (1)$$

このとき, R_t は時間 t における降雨量 [mm/hour], $R_{(t-n)}$ は n 時間前の降雨量 [mm/hour], x は累積雨量時間 [hour] である。本研究では, 過去の降雨の影響を 30 日としたため, $x = 720$ とした。降雨量は気象庁のデータを使用しており, 浪江町は津島観測所, 川内村は川内村観測所のデータを使用している。実効雨量は, 式(1)の半減期 T を変化させることによって数値が変わる。そのために, 土壌含水率との相関が良くなる最適な半減期を用いた実効雨量を求める必要がある。今回は, 1~24 時間, 以降 24 時間ずつで 240 時間 (10 日間) までの計 33 種類の半減期を用いた実効雨量を算出した。その中で, 最も土壌含水率と関係が良くなる半減期を選出する。また, 前述で求めた半減期を用いた実効雨量と土壌含水率を比較し, その時の実効雨量から空間線量率の推定を行う。

また本研究では, 空間線量率に関して 1 時間ごとの観測結果の変動が細かすぎて降雨前後の変化傾向が掴みにくかった。したがって移動平均値を導入することで, 空間線量率の変化を滑らかにして降雨前後のデータを俯瞰することができる。ただし, 移動平均の幅を大きくするほど生の観測データを失ってしまうため, 今回は前後 2 時間の値を考慮し, 時刻 t における空間線量率 $z_{(t)}$ の移動平均値は, 時刻 t における空間線量率 $z_{(t)}$ を用いて, 式(2)で表す。

$$z_{(t)} = \frac{1}{5} \sum_{-2}^2 Z_{(t-n)} \quad (2)$$

実効雨量, 土壌含水率も同様に前後 2 時間の値を用いて算出した移動平均値を使用した。

3. 実効雨量から土壌含水率の推定

本研究では、実効雨量の半減期を単独で用いるのではなく、長期実効雨量 (T=168) と短期実効雨量 (T=2) を組み合わせた新たな実効雨量 Rw' を使用した。その結果、多くの調査地域で長期半減期が 80%、短期半減期が 20% の時、土壌含水率との相関が良かった。したがって、実効雨量 Rw' は式(3)で表される。

$$Rw' = 0.2 \times Rw_2 + 0.8 \times Rw_{168} \quad (3)$$

この時点での土壌含水率との相関は、浪江町で $R=0.74, p<0.05$ 、川内村で $R=0.72, p<0.05$ となり、正の相関関係であった。しかし、降雨時の急激な上昇を捉えることができておらず、実効雨量 Rw' だけでは土壌含水率や空間線量率を再現することは難しかった。そこで、降雨イベントごとの実効雨量の増減量に対する土壌含水率の増減を α とし、次の式(4)で表した⁷⁾。

$$\alpha = \frac{\text{土壌含水率の増減}}{\text{実効雨量の増減}} = \frac{y(t) - y(t-n)}{Rw'(t) - Rw'(t-n)} \quad (4)$$

$$y(t) = \alpha(Rw'(t) - Rw'(t-1)) + y(t-1) \quad (5)$$

α の値は、ヒステリシスを考慮して吸水過程と排水過程で区別した。本研究では、時刻 t の実効雨量 $Rw'(t)$ とその 1 時間前の時刻 $t-1$ の実効雨量 $Rw'(t-1)$ を用いて、 $Rw'(t-1) < Rw'(t)$ の場合を吸水過程とし、 $Rw'(t-1) > Rw'(t)$ の場合を排水過程とする。 α を用いて、土壌含水率を推定する式は式(5)で示される。 α に関して、排水過程では、降雨終了した後の経過時間に伴って α が減少するため、降雨終了から 12 時間、12 時間以降から 48 時間、それ以降で α を減少させた。吸水過程では、降雨イベントごとに異なっていたため、観測期間中の各降雨イベントの α を計算した。その値を各降雨イベントの実効雨量の増加量と比較したところ、実効雨量の増加量が大きくなるにつれて、 α が累乗関数的に減少していく傾向であった (図 2) ため、累乗近似式で求めた α を使用した。前述の α (表 1) を用いて、式(5)より土壌含水率を推定したところ、浪江町で $R=0.91$,

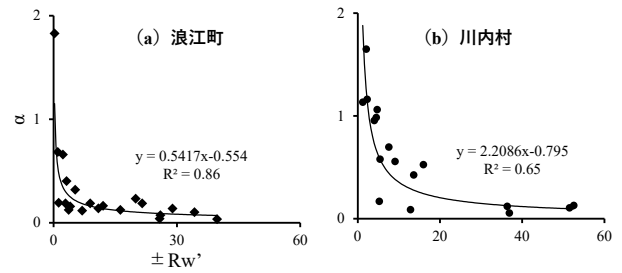


図 2 吸水過程での実効雨量の増減量に対する α

表 1 α の値

地点	吸水過程	排水過程		
		~12h	12~48h	48h~
川内村	$2.2086(\pm Rw')^{-0.795}$	0.6	0.3	0.05
浪江町	$0.5417(\pm Rw')^{-0.554}$	0.3	0.1	0.03

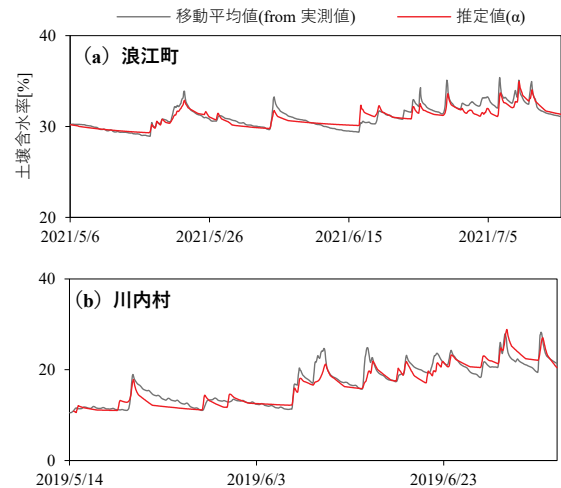


図 3 土壌含水率の推定

灰色線が観測結果、赤線が式(4)の α を用いた推定値を示す

$p<0.05$ 、川内村 $R=0.94, p<0.05$ と良く推定できた (図 3)。

4. 空間線量率の推定

現地観測の結果、浪江町と川内村のいずれも土壌含水率の増加と共に空間線量率が減少しており、含水率 y を用いて、浪江では式(6)、川内村では式(7)によって表すことができる。

$$z_n = -0.1790y_n + 11.655 \quad (6)$$

$$z_k = -0.0030y_k + 0.334 \quad (7)$$

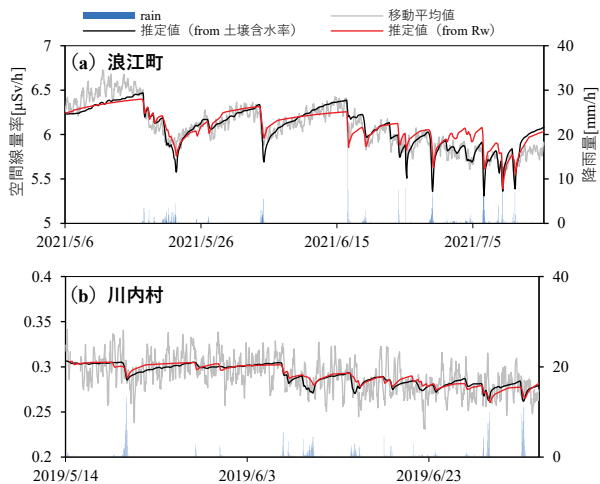


図4 空間線量率の推定

灰色線が移動平均値、黒線が土壌含水率からの推定値、赤線が実効雨量からの推定値

土壌含水率から推定した空間線量率は、現地観測の結果と比較すると(図4)、相関係数が浪江町で $R = -0.91, p < 0.05$ 、川内村では $R = -0.58, p < 0.05$ となり、十分に推定できていた。次に、実効雨量から空間線量率を推定するために、式(6)及び式(7)に、実効雨量から求めた土壌含水率を挿入した。その結果、相関係数は浪江町で $0.87 (p < 0.05)$ 、川内村で $0.57 (p < 0.05)$ と空間線量率を良く再現できていた。しかし、浪江町と比べると空間線量率が低い川内村では推定精度は低かった。このことは、空間線量が高い地域のほうが、予測精度が高いことを示唆する。

5. 今後の展望

本研究では、降雨が発生すると実効雨量が増加し、土壌含水率も上昇することにより、水による遮蔽効果が発生して空間線量率が低下することが明らかになった(図5)。更に、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た。この手法は、空間線量率の一時的な変化が土壌含水率の変化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る。また、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る。

2017年以降、空間線量率への寄与の大部分は土

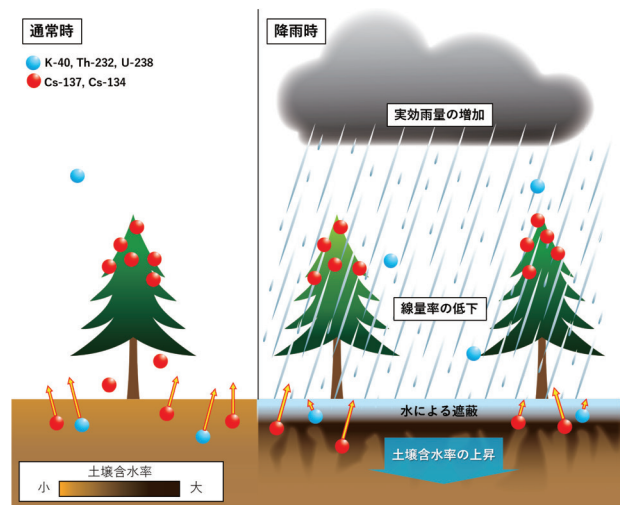


図5 グラフィックアブストラクト

壤表面から5 cm 以内の放射性物質が占めている。これは、土壌表層に ^{137}Cs が存在することに起因すると考えられる⁸⁾。したがって今後の研究では、地表面における ^{137}Cs の存在量を評価する必要がある。また、本研究では夏データ(5~7月)を用いたが、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る。このため、今後の空間線量率を推定するには浸透のみならず、地面からの蒸発を考慮した指標の開発が必要であり、そのためには年間を通じた観測が必要になるであろう。

参考文献

- 1) Basuki, T., *et al.*, *Radiation Measurements*, **137** (2020)
- 2) 安田, 水利科学, **61** (5), 102-130 (2017)
- 3) 土田, 他, 保健物理, **55**, 5-14 (2020)
- 4) Nelson, M. S., & Rittenour, T. M., *Radiation Measurements*, **81**, 142-149 (2015)
- 5) Sanada, Y., *et al.*, *J. Environ. Radioact.*, 223-224 (2020)
- 6) 福田, 他, 応用地質, **50** (4), 216-227 (2009)
- 7) Nakanishi, M., *et al.*, *Environmental Pollution*, **334** (2023)
- 8) Malins, A., *et al.*, *Environmental Radioactivity*, **226** (2021)

(*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 放射線・アイソトープ地球システム研究センター)