

モンテカルロ放射線輸送コード (PHITS) を用いた 森林内空間線量評価ツールの開発

佐久間 一幸^{1,3*}、新里 忠史¹、金 敏植²、Alex Malins²、町田 昌彦²、
吉村 和也¹、操上 広志¹、北村 哲浩¹、細見 正明⁴

¹ 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 福島研究開発部門 (〒963-7700 福島県田村郡三春町深作 10-2)

² 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター (〒277-0871 千葉県柏市若柴 178-4-4)

³ 国立大学法人 東京農工大学大学院 工学府応用化学専攻 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

⁴ 国立大学法人 東京農工大学大学院 工学研究院 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

Development of an Evaluation Tool for Air Dose Rate in Forests Using a Monte Carlo Radiation Transport Code (PHITS)

Kazuyuki SAKUMA^{1,3*}, Tadafumi NIIZATO¹, Minsik KIM², Alex MALINS², Masahiko MACHIDA²,
Kazuya YOSHIMURA¹, Hiroshi KURIKAMI¹, Akihiro KITAMURA¹, and Masaaki HOSOMI⁴

¹Sector of Fukushima Research and Development, Japan Atomic Energy Agency
(10-2 Fukasaku, Miharu-machi, Tamura-gun, Fukushima 963-7700, Japan)

²Center for Computational Science & e-Systems, Japan Atomic Energy Agency
(178-4-4 Wakashiba, Kashiwa, Chiba 277-0871, Japan)

³The Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology
(2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan)

⁴Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology
(2-24-16 Naka-cho, Koganei, Tokyo 184-8588, Japan)

Summary

We developed a tool for creating three-dimensional models of trees, forest litter, soil and land topography in order to undertake PHITS Monte Carlo simulations of air dose rates in forests. Using this tool we modelled a forest in the Ogi district of Kawauchi-mura, Fukushima Prefecture. We considered how the partitioning of radiocesium among the forest canopy, litter layer and soil affected air dose rates by performing multiple simulations with different radiocesium source distributions. Moving radiocesium from the canopy to the litter layer did not affect air dose rates at 1 m above the ground in the simulations employing a source distribution applicable for October 2015. This is because there was almost no radiocesium in the canopy at that time. However air dose rates tended to be high near the canopy, and above the canopy up to 200 m altitude, when the simulations modelled a source distribution applicable for the August to September 2011 period. This is due to the larger amount of radiocesium in the canopy at that time. Transferring the radiocesium from the canopy to the litter layer in this case was associated with a three times increase in the air dose rate at 1 m, as the average distance between the radiocesium in the forest and 1 m height was shortened. In both cases (2011 or 2015 data) radiocesium transfer from the litter layer to the underlying soil was associated with a one third to 50% reduction in air dose rates at 1 m, due to the self-shielding effect of soil. In reality air dose rates at 1 m have been observed to decrease in line with the rate of physical decay of the radiocesium. This may be explained by the shielding effect of the litter layer and soil cancelling the concentration effect of radiocesium transfer from the canopy to the ground surface.

Key Words: Forest, Air dose rate, Monte Carlo Simulation, Radiation transport, Radiocesium

*Corresponding author: E-mail: sakuma.kazuyuki@jaea.go.jp

1. はじめに

森林域における福島第一原子力発電所事故由来の放射性Csの挙動は、事故初期において、針葉樹の樹冠に大部分が捕捉され¹⁾、林内雨、リターフォール等により放射性Csが樹木から林床に移動する他²⁻⁴⁾、林床においてはリター層から土壌層へ年々移動し、深度分布が変化してきている⁵⁾。一方、広葉樹においては、事故初期に落葉していたため、樹冠に捕捉されず、多くは直接林床や土壌層に沈着した⁵⁾。また、土壌中に移動した放射性Csの一部は、経根吸収によって樹木へ移動することが報告されている⁶⁾。さらに森林外への移行量は極めて少ないことが知られている⁷⁻⁸⁾。従って、事故後から現在に至るまで、森林内の放射性Cs分布は時々刻々変化しており、それに伴う放射源の空間的変化が、空間線量の3次元分布にどのように影響するのかといった知見は、森林内での被ばく量の低減や今後の森林除染の方策、及び未評価のCs降下初期の空間線量分布を評価する上で極めて重要となる。

森林内での空間線量評価における困難な点は、場所ごとに樹木やリター、土壌層のCs分布が異なること⁹⁾、土壌やリター、樹木が放射源であると同時に減衰・散乱効果¹⁰⁻¹¹⁾があること、含水率に応じて遮蔽度が変化すること¹²⁾、地形が起伏に富むこと、及び土壌物性が場所ごとに異なること等が挙げられる。

森林内の空間線量評価については、Gonze et al. (2016)¹³⁾が簡易的に植生と土壌層を設定してモンテカルロ計算を行い、今村ら¹⁴⁾は森林内の構造を樹冠層、リター層及び土壌層に分割し、各層の放射性Cs蓄積量に基づき空間線量率を解析的に評価している。

これまで平地の土壌層を放射線源とする空間線量評価¹⁵⁾や斜面からの寄与¹⁶⁾、建物内の空間線量評価¹⁷⁾など事故以降に、様々な媒体や地形条件を考慮した空間線量の評価ツールが開発されてきたものの、森林に普遍的にみられる樹木等を模擬して空間線量を評価した事例は少ない。

そこで本研究では、リター及び土壌中の放射性Csの深度分布や物性、地形、樹木や土壌の遮蔽効果、さらには樹木を模擬したポリゴンを作成し、3次元放射源を考慮した森林域における空間線量評価ツールの開発を行った。そのツールを用いて森林内の空間線量率に対する各放射線源の寄与あるいは遮蔽、散乱効果のより定量的な評価を最終目的とする。今回は開発したツールを日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)の観測サイトである福島県川内村荻地区のスギ林に適用し、森林内の放射性Cs動態(2015年と2011年を想定)を考慮した定性的な解析結果を報告する。

2. 方法

(1) 森林内モデル

樹木については、図1のように、樹高、生枝下高、胸高直径(地上高1.3 mでの直径)、枝張りといった4つの特徴量を

指定して樹木モデルを作成した。樹幹については、形状は図1のような円柱型を作成した。また、図2のように樹皮と辺材、心材を考慮し、その各々について、18)の方法に従い、容積比(%)と容積密度(g/cm^3)を与えた(表1)。枝葉については、図3のように、針葉樹は円錐でモデル化し、底辺半径は枝張りの半分、高さは(樹高)-(生枝下高)とした。本研究で解析した森林では針葉樹のみが分布するため、樹木については、針葉樹のみとした森林モデルを作成した。葉と枝については、胸高直径を変数とする枝及び葉の乾燥重量との相対成長関係式より算定した。与え方は以下の関係式およびパラメータを用いた(針葉樹:スギ)¹⁸⁾。

$$Y = A \times (\text{胸高直径})^B \dots\dots\dots (1)$$

ここで、乾燥重量Y(kg)、胸高直径(cm)、葉:A=4.36 $\times 10^{-3}$ 、B=2.61、枝:A=4.36 $\times 10^{-4}$ 、B=3.17。

さらに、後述のとおり、樹木試料の室内試験で得られる含水率を各部位に適用して生材料重量(g)を指定した。

$$\text{生材重量} = \text{乾燥重量} \times (1 + (\text{含水率})) \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{含水率} = (\text{生材重量} - \text{乾燥重量}) / \text{乾燥重量} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、生材重量(g)、乾燥重量(g)、含水率(-)。

また樹幹、枝葉の化学成分は、C、H、Oとした。樹木の各部位に対して、¹³⁴Csおよび¹³⁷Cs濃度(Bq/cm^3)を与えた。以上の樹木モデルを、後述する立木密度に基づいて、10 m DEMデータ¹⁹⁾を用いて作成した地形面上にランダムに分布するように配置し、森林内モデルを作成した(図4)。

リター層および土壌層モデルについては、土壌およびリターの物性、層厚、含水量、¹³⁴Csおよび¹³⁷Cs深度分布を、図5のようにモデル化した。モデルでは、リター層厚を1 cm、土壌層厚を表層から0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 1.0, 2.0, 2.0, 3.0 cmに区分した。リター層元素は有機物(構成元素C, H, N, O等)とし²⁰⁾、土壌層は無機元素(構成元素Si, Al, Fe, H, O)を考慮した²⁰⁾。またリター層より上部に空気層(構成元素H, C, N, O, Ar)を設定した。

(2) 調査サイトとモデル化

空間線量評価ツールの適用サイトは、福島第一原子力発電所の南西15 kmに位置する福島県川内村荻地区の針葉樹林(スギ林)である。サイト内に生育するすべてのスギ立木の本数と胸高直径を計測後、頻度の高い胸高直径(15-20 cmを1本、20-25 cmを1本、25-30 cmを2本、30-35 cmを1本)のスギ立木を選定して(図6)、2015年10月27-29日に伐採し、樹高、生枝下高、胸高直径の測定(表2)とともに、葉、樹皮、辺材、心材をサンプリングした。室内にて計測した樹皮、辺材及び心材の容積密度から現存量を算出した。さらに、含水率、¹³⁴Csおよび¹³⁷Cs濃度を測定した(表3)。また、サイトの面積とスギ立木の本数から立木密度を算出した(表2)。枝

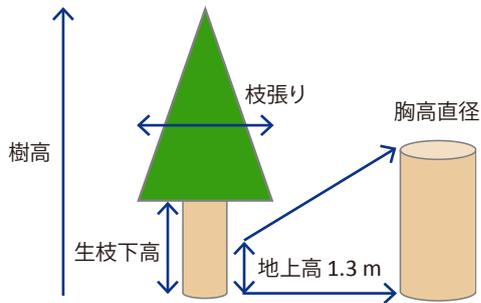


図1 樹木モデルの特徴量

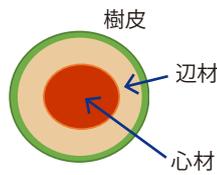


図2 樹幹モデル

表1 樹皮、辺材、心材の容積比および容積密度

	容積比 (%)	容積密度 (g/cm ³)
樹皮	5.8	0.234
辺材	62.0	0.231
心材	32.2	0.266

円錐(針葉樹)

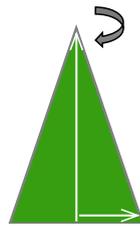
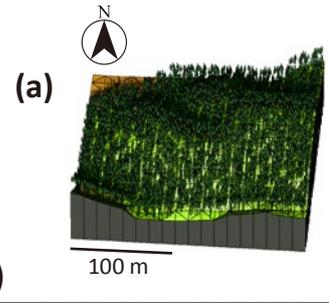


図3 枝葉モデル



(a)

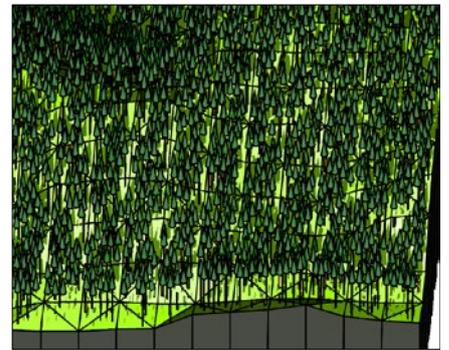


図4 森林内3次元モデル (ANGEL 4.35 を用いて描画)

(a) モデル適用範囲の全体図 (b) 拡大図

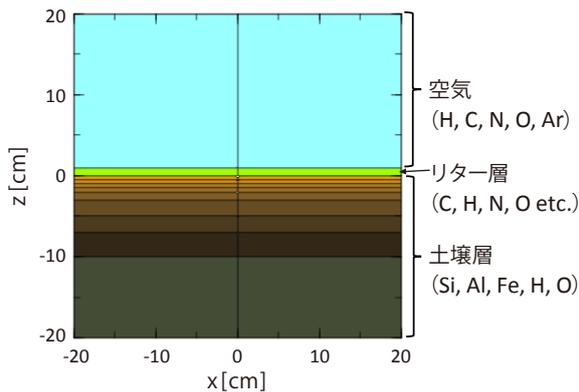


図5 リター層および土壌層モデル (ANGEL 4.35 を用いて描画)

張りは実測値がないため、表2のように仮定した。2015年10月30日にスクレーパープレート(採取面積15 x 30 cm)を用いて、調査サイト内の3か所(図6)でL、F層、土壌を0-10 cmまでは1 cm厚、10-18 cmは2 cm厚ごとに採取した。各層毎に湿潤および乾燥重量(g)、含水率(-)、¹³⁴Cs及び¹³⁷Cs濃度(Bq/kg)を測定し、3か所の平均値をモデルへの入力データとして用いた。いずれも放射能測定にはゲルマニウム半導体検出器(スモールアノードウェル型Ge半導体検出器GSW 275L、CANBERRA Industries Inc., Meriden, CT, USA)を用いて行い、¹³⁴Cs濃度は604.66 keV、¹³⁷Cs濃度は661.64 keVのエネルギーピークを使用した。マルチチャンネルアナライザ(DSA-LX™ デジタルシングルアナライザ、CANBERRA Industries Inc., Meriden, CT, USA)で得た

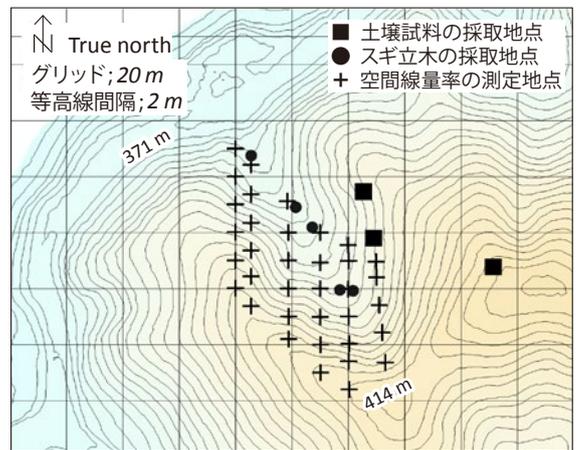


図6 調査サイトにおける土壌試料、スギ立木の採取地点及び空間線量率の測定点

等高線データは国土地理院による航空レーザー測量成果を利用。地形図作成には Surfer 11.6 (Golden Software, Inc., USA) を用いて描画

表2 樹木の特徴量および立木密度

樹高 (m)	生枝下高 (m)	枝張 (m)	胸高直径 (cm)	立木密度 (本/ha)
21.5	14.6	2.1	21.6	731

表3 樹木における放射性 Cs 濃度

	容積密度 (g/cm ³)	¹³⁴ Cs (Bq/cm ³)		¹³⁷ Cs (Bq/cm ³)		含水率 (-)
		2015年実測ベース ^a	2011年実測ベース ^b	2015年実測ベース ^a	2011年実測ベース ^b	
枝葉	0.0048	0.055	0.51	0.16	0.59	0.528
樹皮	0.234	1.02	3.25	3.05	3.77	0.41
辺材	0.231	0.0156	0.044	0.047	0.051	0.64
心材	0.266	0.019	0.02	0.056	0.023	0.41

a: 2015年10月現地取得データ

b: 2015年10月現地取得データおよび放射性Cs濃度のみ2011年8-9月取得データ

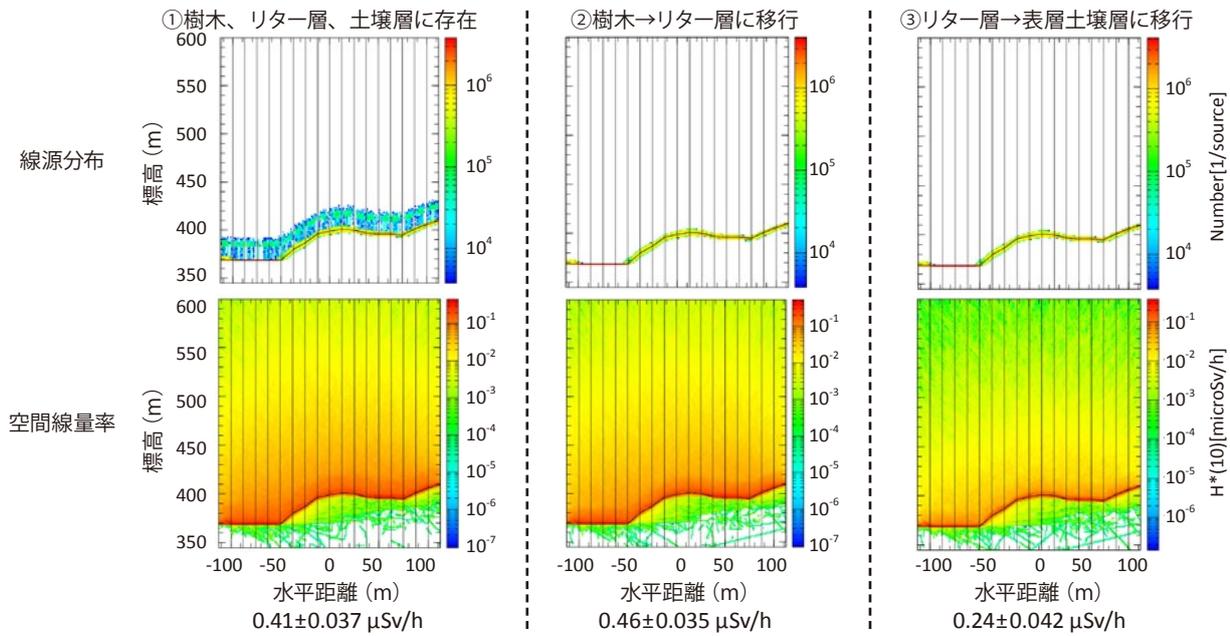


図7 放射性Cs分布および空間線量率分布

2015年10月現地取得データに基づき計算。ANGEL 4.35を用いて描画。
下部の値は地上1m高さの空間線量率の平均値。エラーバーは相対誤差

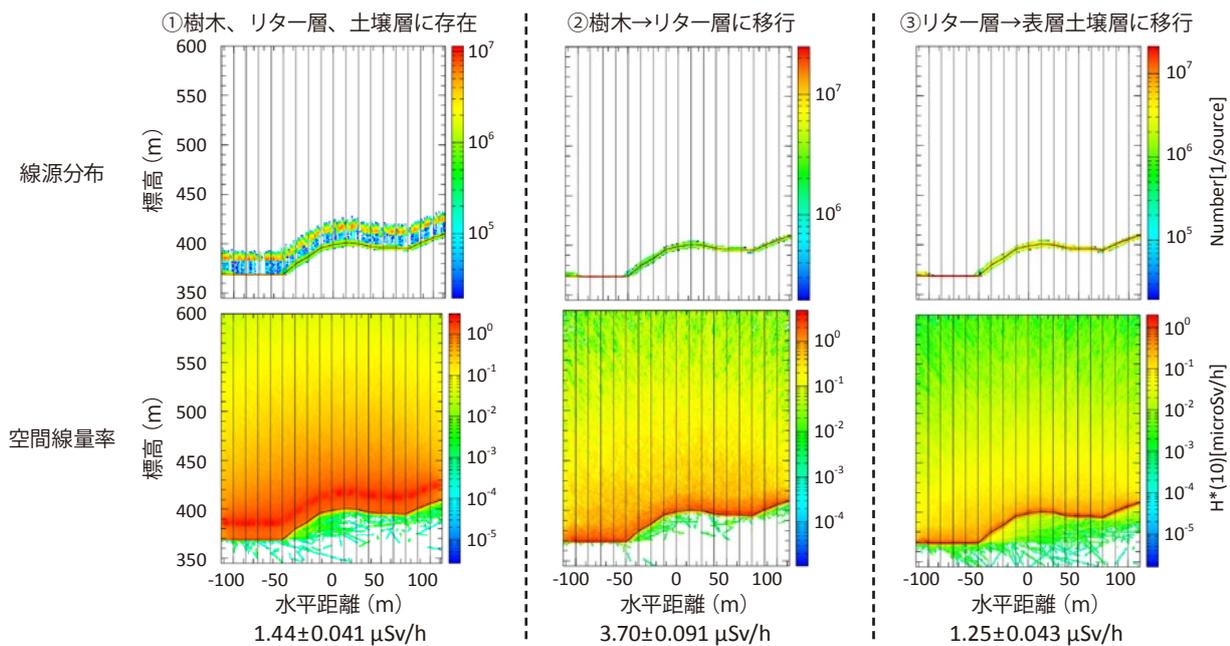


図8 放射性Cs分布および空間線量率分布

2015年10月現地取得データおよび放射性Cs濃度のみ2011年8-9月取得データに基づき計算。
ANGEL 4.35を用いて描画。下部の値は地上1m高さの空間線量率の平均値。エラーバーは相対誤差

表4 リターおよび土壌層パラメータ

層	スクレーパー 層厚 (cm)	全乾重量 (g/cm ³)	¹³⁴ Cs (Bq/cm ³)			¹³⁷ Cs (Bq/cm ³)			含水率 (-)
			ケース①	ケース②	ケース③	ケース①	ケース②	ケース③	
リター層	1.0	0.17	1.35	1.86	0.00	7.85	10.0	0.00	0.29
	0.5	0.11	1.71	1.71	5.42	7.53	7.53	27.5	0.52
	0.5	0.11	1.71			7.53			0.52
土壌	0.5	0.10	0.89			3.88			0.47
	0.5	0.10	0.89			3.88			0.47
	1.0	0.11	0.42			1.87			0.44
	2.0	0.11	0.18			0.78			0.41
	2.0	0.16	0.11			0.43			0.41
	3.0	0.18	0.06			0.25			0.39

2015年10月現地取得データに基づき作成

表5 リターおよび土壌層パラメータ

層	スクレーパー 層厚 (cm)	全乾重量 (g/cm ³)	¹³⁴ Cs (Bq/cm ³)			¹³⁷ Cs (Bq/cm ³)			含水率 (-)
			ケース①	ケース②	ケース③	ケース①	ケース②	ケース③	
リター層	1.0	0.17	10.3	50.7	0.00	11.9	58.8	0.00	0.29
	0.5	0.11	1.13	1.13	103	1.31	1.31	119	0.52
	0.5	0.11	1.13			1.31			0.52
土壌	0.5	0.10	1.06			1.23			0.47
	0.5	0.10	1.06			1.23			0.47
	1.0	0.11	1.16			1.34			0.44
	2.0	0.11	1.09			1.26			0.41
	2.0	0.16	0.05			0.06			0.41
	3.0	0.18	0.06			0.07			0.39

2015年10月現地取得データおよび放射性Cs濃度のみ2011年8-9月取得データに基づき作成

ガンマ線スペクトルデータは、 γ エクスローラー・プラス（キャンベラジャパン株式会社、東京）にて解析した。効率校正は、100 mlのU-8型容器に封入した日本アイソトープ協会の標準線源を使用した。また、計算対象領域内において（図6）、2015年10月1日に約10 m間隔で格子状にエネルギー補償型 γ 線用シンチレーションサーベイメータ（TCS-172B、日立アロカメディカル株式会社）を用いて空間線量率を測定した（ $1.49 \pm 0.20 \mu\text{Sv/h}$, $n=36$ ）。

以上の観測データを用いて、森林内3次元放射源モデルを作成した（図7、8の上段）。モデルの解析ケースとしては、放射性Csが樹木、リター層、土壌層に存在するケース①、樹木に存在していた放射性Csが全てリター層に移行したケース②、リター層に存在した放射性Csが全て表層土壌層に移行したケース③、計3つのケース（表4）を想定してシミュレーションを実施した。

さらに2015年10月の観測値では、放射性Csのほとんどが既にリター層、土壌層へと移動してしまっていたため、Imamura et al. (2017)⁵⁾の2011年8-9月の放射性Csデータを基に、樹木に多量の放射性Csが存在するパターン（表3、5）を想定し、上記と同様にそれらが、リター層、土壌層へと移動したケース（表5）を設定した。放射性Csデータ以外は、現

地の観測データをそのまま用いた。

(3) モンテカルロ放射線輸送シミュレーション

開発したツールを用いてジオメトリと物質、放射源を3次元的に配置し、そのデータを基にモンテカルロ放射線輸送コードPHITS (The Particle and Heavy Ion Transport code System - version 2.64)²¹⁾を用いて、森林内の放射線挙動をシミュレーションした。ヒストリー数は40万回、バッチ数は11回で統計処理を行なった。出力された粒子フルエンスについては、ICRP 1997, Publ.74²²⁾の換算係数($\mu\text{Sv cm}^2$)を用いて、空間線量率($H^*(10)(\mu\text{Sv/h})$)に換算した。

3. 結果および考察

図7について、放射性Csが樹木、リター層、土壌層に存在するケース①では、2015年10月の時点でほとんど樹木には放射性Csは残存していないため、樹木からリター層に移行したケース②とほとんど傾向が変わらない結果となった。しかし、リター層から表層土壌層に移行するケース③においては、地表面近傍を除き、一様に地上~200 m上空まで減少傾向が見て取れた。また地上1 m高さの空間線量率をケース毎に比較すると、この放射性Cs分布において、ケース①、②では、

リター自身の遮蔽効果よりも線源が近くなったことによりわずかに空間線量率が高く、他方、ケース③では、表層土壌内での遮蔽が非常に大きいので、ケース③とケース①、②では2倍程度の違いがあった。つまり、2015年以降、リターフォールによる空間線量率の上昇は限定的と考えられ、また徐々に土壌浸透することによって空間線量率は減少傾向になると予測される。

地上1 m高さの空間線量率の実測値としては、計算対象領域内で $1.49 \pm 0.20 \mu\text{Sv/h}$ ($n=36$)であるため、図7より、計算値($0.41 \pm 0.037 \mu\text{Sv/h}$)は3分の1程度過小評価している結果となった。航空機を用いた空間線量率の実測値は $1.7 \mu\text{Sv/h}$ (福島県及びその近隣県における航空機モニタリング(2015年11月4日時点)データ²³⁾)であり、観測サイトの測定値と整合的であった。しかし、第3次航空機モニタリングデータ²³⁾の¹³⁷Csインベントリは 820 kBq/m^2 (2011年7月2日時点)と今回モデルの入力値として用いたインベントリ $250 \pm 145 \text{ kBq/m}^2$ ($n=3$) (2015年10月30日時点)を比較すると、平均で約3倍程度の開きがあった。サンプリングの際に、可能な限り代表性のあるポイント3地点を選んでリター及び土壌を採取したが、尾根に対して西側ということもありインベントリが低かった可能性が考えられたが²⁴⁾、定量的な妥当性評価は今後の課題として挙げられる。

図8について、放射性Csが樹木、リター層、土壌層に存在するケース①では、樹冠に放射性Csが存在するので、樹冠近傍で線量率が高い傾向が得られ、また樹木からリター層に移行するケース②では、地面近傍が上がり、樹冠近傍は下がり、樹冠、樹幹による遮蔽効果から、地上200 mまでの範囲において大きく減少傾向が見て取れた。高さ方向の空間線量率の定性的な分布は、森林内に観測タワーを建てて、測定された空間線量率のデータと同様の傾向を示した²⁵⁾。リター層から表層土壌層に移行するケース③では、表層土壌内での遮蔽効果が大きいものの、全体的な傾向としては大きくは変わらなかった。

しかし、図8より地上1 m高さの空間線量率をケース毎に比較すると、この放射性Cs分布では、ケース②ではリター自身の遮蔽効果よりも線源が近くなったことにより大幅に高くなり、一方ケース①は、空気の遮蔽は大きくないものの、地上1 m高さに対して距離が20 m程度(表2)あり、かつ、樹幹自身の遮蔽もあいて、ケース②で2-3倍程度高くなった²⁶⁾。ケース③では、土壌は非常に遮蔽が効くのでケース②と比較して、3倍程度低い傾向を示した。もちろん、この結果は今回のパラメータ設定に依存するものである。実際の測定^{25, 27)}においては、森林内においてこれほどの空間線量率の変化は認められていない。さらに、実際はリターフォールが起こりつつ、リター、土壌層の放射性Cs深度プロファイルは大きくなるが、今回の計算ケースでは、リター、土壌層での下方浸透を考慮していないため過大評価している可能性が考えられる。

樹木高さ、枝葉の放射性Cs濃度あるいは含水量等、様々なファクターについて、今後さらなる感度解析を行う予定である。

モデル上での放射性Csの与え方に対する考察として、実測ではOgawa et al. (2016)²⁸⁾のように心材、辺材の濃度も一様ではないが、モデルでは一様に与えているため、現実とは異なる。しかし、樹木内部の放射性Cs存在量は、樹冠やリター層、土壌層と比べ、微量であるため、樹幹の自己遮蔽とCs存在割合の少なさから、空間線量率にはほとんど影響しないと考えられる。

リター層、土壌層中の放射性Cs深度プロファイルについては、3地点の平均値を全平面に与えているが、実際は深度プロファイルも空間分布が存在する²⁹⁾。さらに、林床における放射性Csインベントリの水平方向の不均一性も報告され^{9, 30)}、これ以上の詳細なモデル化は難しい。しかし、それらをできる限り現実に近い形でモデル化を行い、樹木を地上に生やし、放射源を与え、モンテカルロ放射線シミュレーションを行う意義として、今後の森林内における空間線量率はどうに減少するのか、樹木が存在することによって本当は空間線量率が上がるのかあるいは下がるのか、どこの媒体(樹冠、樹幹、リター層、土壌層)が地上1 mあるいは200 m空間線量率にどの程度寄与しているのか、といった課題に対して定性的に、可能な限り定量的に示唆できる点である。

4. まとめと今後の展開

樹木の形状モデルと地形、リター土壌をモデル化できるツールの開発を行った。開発したツールと放射線輸送コードPHITSを用いた空間線量率分布の試算を実施した。森林内の放射性Cs動態を考慮した定性的な感度解析を実施した結果、2015年10月取得の観測データを用いた解析結果においては、樹冠にはほとんど放射性Csが残存しておらず、リター層、土壌層に多くが存在することによって、樹冠からリター層へ移行しても空間線量率への影響はほとんどないことが示唆された。一方、2011年の放射性Csデータを用いた同解析においては、樹冠に多量の放射性Csが存在することによって、樹冠近傍や地上から数十m～200 m程度において、空間線量率が高い傾向が見て取れ、樹冠からリター層に移行すると、地上1 m高さの空間線量率が大きく上昇し、その後土壌層へ移行することによって大きく遮蔽されることが結果から読み取れた。しかし、他の観測サイトの測定においては、森林内の空間線量率はほぼ物理減衰程度であった^{25, 27)}。これは、線源が樹冠から林床に移ることによる上昇の効果と、リターから土壌に移行することによる低下の効果が相殺した結果である可能性がある。今後、土壌へのさらなる浸透や樹木への経根吸収など、さらに線源分布が変わることが予想され、それに伴い線量率がどう変わっていくのかを引き続き調べていく必要がある。モデル開発の今後の展開としては、バリデーションが不十分であるので、さらなる観測結果を用いた妥当性の検証、

樹木やリター層、土壌層からの空間線量率への寄与の定量的な評価、そして樹木の遮蔽・散乱効果の評価を行う予定である。

謝 辞

原子力機構福島環境安全センターおよびシステム計算科学センターの方々には、調査データの取得や解析手法の助言等ご協力いただきました。また、筑波大学・恩田教授、林野庁・井上放射性物質影響評価官、神利彦専門官、藤代除染技術係長、アジア航測株式会社・野口様、茶山様、高度情報科学技術研究機構・長谷川様、柳様はじめ、他方の方々のご協力をいただきました。数値シミュレーションは、原子力機構のSGI ICE X スーパーコンピュータを用いて実施した。等高線データは、国土地理院による航空レーザー測量結果を利用していただきました。なお、本研究では、文部科学省による平成27年度原子力人材育成等推進事業費補助金「オープン教材の作成・活用による実践的原子力バックエンド教育」(研究代表者、小崎完)のフィールド実習で得られた成果を一部使用した。

参 考 文 献

- H. Kato, Y. Onda, T. Gomi : Interception of the Fukushima reactor accident-derived ^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{131}I by coniferous forest canopies. *Geophys. Res. Lett.*, **39**, L20403 (2012).
- H. Kato, Y. Onda, K. Hisadome, N. Loffredo, A. Kawamori : Temporal changes in radiocesium deposition in various forest stands following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *J. Environ. Radioact.*, **166**, 449-457 (2017).
- M.T. Teramage, Y. Onda, H. Kato, T. Gomi : The role of litterfall in transferring Fukushima-derived radiocesium to a coniferous forest floor. *Sci. Total Environ.*, **490**, 435-439 (2014).
- I. Endo, N. Ohte, K. Iseda, K.T. anoi, A. Hirose, N.I. Kobayashi, M. Murakami, N. Tokuchi, M. Ohashi : Estimation of radioactive 137-cesium transportation by litterfall, stemflow and throughfall in the forests of Fukushima. *J. Environ. Radioact.*, **149**, 176-185 (2015).
- N. Imamura, M. Komatsu, S. Ohashi, S. Hashimoto, T. Kajimoto, S. Kaneko, T. Takano : Temporal changes in the radiocesium distribution in forests over the five years after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Sci. Rep.*, **7**, e8179 (2017).
- V. Yoschenko, T. Takase, A. Konoplev, K. Nanba, Y. Onda, S. Kivva, M. Zheleznyak, N. Sato, K. Keitoku : Radiocesium distribution and fluxes in the typical *Cryptomeria japonica* forest at the late stage after the accident at Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant. *J. Environ. Radioact.*, **166**, 45-55 (2017).
- K. Yoshimura, Y. Onda, H. Kato : Evaluation of radiocesium wash-off by soil erosion from various land uses using USLE plots. *J. Environ. Radioact.*, **139**, 362-369 (2015).
- T. Niizato, H. Abe, K. Mitachi, Y. Sasaki, Y. Ishii, T. Watanabe : Input and output budgets of radiocesium concerning the forest floor in the mountain forest of Fukushima released from the TEPCO's Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident. *J. Environ. Radioact.*, **161**, 11-21 (2016).
- M. Takada, T. Yamada, T. Takahara, T. Okuda : Spatial variation in the ^{137}Cs inventory in soils in a mixed deciduous forest in Fukushima, Japan. *J. Environ. Radioact.*, **161**, 35-41 (2016).
- A. Clouvas, S. Xanthos, M. Antonopoulos-Domis, D.A. Alifragis : Contribution of ^{137}Cs to the total absorbed gamma dose rate in air in a Greek forest ecosystem: measurements and Monte Carlo computations. *Health Phys.*, **76**, 36-43 (1999).
- A. Clouvas, S. Xanthos, M. Antonopoulos-Domis, D.A. Alifragis : Radiocesium gamma dose rates in a Greek pine forest: measurements and Monte Carlo computations. *Radioactivity in the Environment*, **7**, 1155-1166 (2005).
- A.V. de Groot, E.R. Van Der Graaf, R.J. de Meijer, M. Maučec : Sensitivity of in-situ γ -ray spectra to soil density and water content. *Nucl. Instr. Meth. A.*, **600**, 519-523 (2009).
- M.A. Gonze, C. Murlon, P. Calmon, E. Manach, C. Debayle, J. Baccou : Modelling the dynamics of air dose rates induced by radiocesium in the Fukushima terrestrial environment. *J. Environ. Radioact.*, **161**, 22-34 (2016).
- 今村 直広, 赤間 亮夫, 大谷 義一, 小林 政広, 坪山良夫, 高橋 正通: 森林内の放射性セシウム分布を考慮した空間線量率の推定. 日本森林学会誌, **99**, 1-9 (2017).
- A. Malins, H. Kurikami, S. Nakama, T. Saito, M. Okumura, M. Machida, A. Kitamura : Evaluation of ambient dose equivalent rates influenced by vertical and horizontal distribution of radioactive cesium in soil in Fukushima Prefecture. *J. Environ. Radioact.*, **151**, 38-49 (2016).
- A. Malins, M. Okumura, M. Machida, K. Saito: Topographic Effects on Air Dose Equivalent Rates from

- Radiocesium Fallout. Proceedings of Joint International Conference on Mathematics and Computation, Supercomputing in Nuclear Applications and the Monte Carlo Method, 12 pages (2015).
- 17) T. Furuta, F. Takahashi : Study of radiation dose reduction of buildings of different sizes and materials. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **52**, 897-904 (2015).
- 18) 梶本 卓也, 高野 勉, 齊藤 哲, 黒田 克史, 藤原 健, 小松 雅史, 川崎 達郎, 大橋 伸太, 清野 嘉之: 森林生態系における樹木・木材の放射性セシウム分布と動態の調査法. 森林総合研究所研究報告, **13**, 113-136 (2014).
- 19) 国土地理院 HP (<https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>), 2018 年 1 月閲覧.
- 20) 犬伏 和之: 2 章 土壌の構成, 「土壌学概論」, 安西 徹郎, 犬伏 和之編, 9 pages, 朝倉書店, 東京 (2001).
- 21) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, P. Tsai, N. Matsuda, H. Iwase, N. Shigyo, L. Sihver, K. Niita: Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. *J. Nucl. Sci. Technol.*, **55**, 684-690 (2018).
- 22) ICRP : Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation. ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (3-4) (1996).
- 23) 「航空機モニタリングによる空間線量率の測定結果」原子力規制委員会 HP (<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/362/list-1.html>), 2018 年 1 月閲覧.
- 24) M. Atarashi-Andoh, J. Koarashi, E. Takeuchi, K. Tsuduki, S. Nishimura, T. Matsunaga: Catchment-scale distribution of radiocesium air dose rate in a mountainous deciduous forest and its relation to topography. *J. Environ. Radioact.*, **147**, 1-7 (2015).
- 25) 「土壌に蓄積した放射性セシウムの移行状況調査」日本原子力研究開発機構 HP (<https://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/pdf06/2-2.pdf>), 2018 年 2 月閲覧.
- 26) V. Golikov, A. Barkovski, V. Kulikov, M. Balonov: Gamma ray exposure due to sources in the contaminated forest. In “Contaminated Forests”, ed. by I. Linkov and W. R. Schell, Springer Com., pp. 333-341 (1999).
- 27) 「森林における放射性物質の状況と今後の予測について」福島県森林計画課 HP (<http://www.pref.fukushima.lg.jp/uploaded/attachment/221567.pdf>), 2018 年 2 月閲覧.
- 28) H. Ogawa, Y. Hirano, S. Igei, K. Yokota, S. Arai, H. Ito, A. Kumata, H. Yoshida: Changes in the distribution of radiocesium in the wood of Japanese cedar trees from 2011 to 2013. *J. Environ. Radioact.*, **161**, 51-57 (2016).
- 29) H. Kato, Y. Onda, T. Wakahara, A. Kawamori: Spatial pattern of atmospherically deposited radiocesium on the forest floor in the early phase of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. *Sci. Total Environ.*, **615**, 187-196 (2018).
- 30) K. Ochi, M. Sasaki, M. Ishida, S. Hamamoto: Estimation of the Vertical Distribution of Radiocesium in Soil on the Basis of the Characteristics of Gamma-Ray Spectra Obtained via Aerial Radiation Monitoring Using an Unmanned Helicopter. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **14**, e926 (2017).

2018 年 3 月 13 日受付

2018 年 5 月 25 日受理

(第 6 回研究発表会 座長推薦論文)

和文要約

モンテカルロ放射線輸送コード (PHITS) を用いて森林内の放射線挙動をシミュレーションするために、森林内樹木モデルやリターおよび土壌層モデル、さらには起伏等を考慮し、森林内 3 次元放射源モデルの作成ツールを開発した。開発したモデルを用いて、福島県川内村荻地区を対象に、森林内放射性 Cs 動態を考慮した計算を実施した。その結果、2015 年 10 月時点の観測データを用いると、樹木に放射性 Cs がほとんど存在しないため、樹冠からリター層へ移行してもほとんど地上 1 m 空間線量率は変化しなかった。一方、2011 年 8-9 月時点の放射性 Cs 濃度を用いると、樹冠に放射性 Cs が多く存在し、樹冠近傍や地上 200 m 程度まで空間線量率が高い傾向が見られ、樹冠からリター層へ移行すると、地上 1 m 高さの空間線量率は、線源からの距離が近くなったことにより 3 倍程度大きくなった。いずれの入力データにおいても、樹冠から土壌層へ放射性 Cs が移行することで、土壌の遮蔽効果により地上 1 m 高さの空間線量率は 3 分の 1 から 2 分の 1 程度減少した。実際には、樹冠からリター層への移行とリター層から土壌層への移行の効果が相殺されて、空間線量率の低下は物理減衰程度になっていると考えられる。