

# 放射能汚染した森林の空間線量について

梅田 健太郎\* 小林 悌二\*\*

## Study on radiation dose from radioactive contaminated forest

Kentaro UMEDA\* and Teiji KOBAYASI\*\*

In the accident in Fukushima Daiichi nuclear power station of Tokyo Electric Power Co. (TEPCO) in 2011, large amount of radioactive materials was released into the environment and wide forest around Fukushima Prefecture was contaminated. Air dose rates in Fukushima Prefecture remains high and decontamination works in residential area and forest near residential area have been conducted. For efficient decontamination in forest, it is important to estimate contribution from contaminated forest region to air dose rates. In this paper, to investigate the effect of decontamination applied in forest, we estimate air dose rates from radiation sources in deposited in forest by solving Boltzmann transport equation with Monte Carlo methods. Comparing the calculation results with the data reported, we confirmed the application of present calculation procedure is useful to estimate quantitatively effects of decontamination methods implemented in Fukushima Prefecture forest.

### 1. はじめに

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所（以下、福島第一）の事故で、大量の放射性物質が放出され、福島県およびその周辺県の地表面に降下した[1]。避難指示区域に指定された人々は避難を余儀なくされ、放射能の除染作業により避難指示解除が進んでいるが、5年経過した現在でも、解除の目処がたたない居住制限区域、帰還困難区域が存在している。

事故発生以来、環境省は環境回復検討会を組織し、除染実施作業に関する一連の調査・研究成果を公表している[2-8]。報告には、森林除染に関わる調査・実証試験も含まれている。平成24年7月の第5回環境回復検討会において、「森林除染の考え方の整理(案)」[4]が提出され、森林除染に関する基本方針が示された。森林除染は林縁から20m程度の範囲を目安にすること、また、森林内の除染は、作業員が日常的に同一場所で活動する場所、あるいは、利用者が一定期間同一の場所に滞在する場所を対象にすることが述べられている。平成25年8月の第9回環境回復検討会では、森林除染のあり方に関係する様々な知見が整理され[6]、森林内の放射性物質の分布状況と経時変

化、除染の実証試験結果が報告されている。そして、平成27年12月の第16回環境回復検討会では、「フォローアップ除染の考え方」、「森林における放射性物質の対策の方向性について」が公表された[8]。そこには、IAEAからの助言[9]が反映され、第5回環境回復検討会の資料9[4]において、「森林の除染は、一般公衆の被ばく線量の低減に自動的に繋がる訳ではなく、また、森林の除染が一般公衆の被ばく線量の低下に繋がるかどうか安全評価が行われるべき」という考え方が述べられている。

平成26年9月の日本学術会議農学委員会林学分科会の報告[10]では、高濃度汚染地帯の現地調査が実施されておらず、調査データに偏りがあることが懸念されるため、今後数十年にわたる汚染地域全体の変化を観測できるモニタリング体制の構築とともに、現地調査結果との突き合わせを経た解析・予測モデルの開発とシミュレーションの必要性が課題であると述べられている。

本稿では、環境回復検討会から公開された調査結果、実証試験結果・シミュレーション結果を参照し、これまで報告されているデータを使用して汚染された森林からの空間線量率を、ボルツマン輸送方程式をモンテカルロ法[11]で解くことにより解析する。公表されている結果と比較して計算モデルの妥当性を確認し、検証された計算モデルを用いて、汚染された森林を線源領域とする森林内および森林に隣接する居住地の空間線量率を

2016年10月18日受理

\* 共通教育センター 教授

\*\* (元)新潟大学医学部 教授

評価する。

森林内の放射性物質の分布状況のデータが公開・整理された現段階で、森林が放射性物質で汚染された場合の森林内および森林に隣接する居住地の空間線量率を評価し、その特徴を整理しておくことは、放射能に汚染した森林内での被ばく線量を推定する際の基礎的な情報を提供すると考える。

## 2. 計算方法

### 2.1 森林のモデル化

福島県は県土の 71% が森林であり、森林の植生（構成樹種、立木密度、樹高、胸高直径、傾斜など）は様々である[12,13]。環境省環境回復検討会は森林を、居住地・農耕地に隣接する森林をエリア A、キャンプやきのこ栽培・林業で日常的に人が立ち入る森林をエリア B、それ以外の森林をエリア C に区分し、今後の森林除染のあり方を検討している[5,8]。

本稿では、放射能で汚染されたエリア A、および、エリア B の森林を対象として空間線量率をシミュレーションする手法を検討する。解析対象の森林として、森林の実地調査が行われ、森林の樹種、樹齢、直径、樹高、生育量などの基礎的なデータ、また、森林における放射性物質の分布状況、空間線量実測値、および、除染作業の実施結果などが報告されている調査林分である、福島県川内村スギ人工林を選ぶ[14,15]。シミュレーションを行うにあたり、森林のモデル化がより現実的に行なうことができ、また、シミュレーション結果を実測値と比較することによりシミュレーションの妥当性が評価できる。

放射能で汚染した平地の、ある線量率評価位置の空間線量率には、評価位置を中心とする半径 20~30m の周囲からの寄与が約 80% である[16-18]。汚染した森林においても同様な傾向があると考えられる。森林の木々は放射線線源でもあり、かつ、遮蔽体でもある。森林内の木々と空気を均質に混合した物質で森林の遮蔽効果をモデル化することがまず考えられるが、評価点近傍の周囲からの寄与を評価するには、均質化された遮蔽体よりも木々がある間隔をもって存在する状態を模擬する非均質化構造でシミュレーションするのがより現実的と考えられる。川内村スギ林は人工林であるため、木々はある間隔で育成されている。川内村スギ人工林のモデル化は、立木密度、樹高、胸高直径、幹材積等の調査データに基づき行った。

文献 15 で報告されている立木密度約 1500 本/ha、

胸高直径約 20cm、樹高約 15m、また、幹材積、森林のバイオマスデータを考慮し、地表部直径 20cm、樹高 15m、樹高部直径 8cm、密度  $0.4\text{g/cm}^3$ （成分はセルロース）で 1 本の木をモデル化し、森林内の木の配置は立木密度から 1 辺 2.6m の正方形格子中央に格子状に配置した。また、1 辺 1.6m の 6 角格子中央に 6 角格子状に配置したモデル、森林を空気（標準大気、文献 18）と木々で均質化したモデルでもシミュレーションを行い、立木の配置による影響、森林を均質化した場合の遮蔽効果を確認した。

図 1a~1c に、本シミュレーションでモデル化する森林および森林に隣接する居住地のシミュレーション体系の概念図を示す。詳細は 3 章の計算結果で述べる。

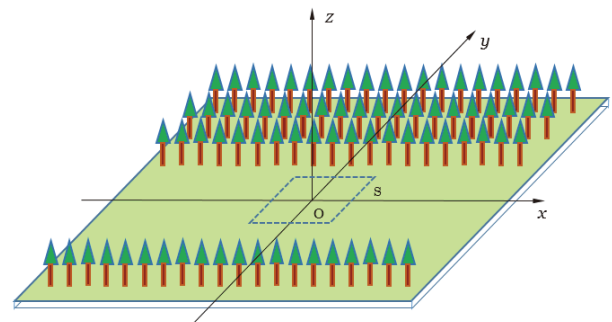


図 1a 森林内の空間線量率を計算するときの森林を正方格子でモデル化する概念図

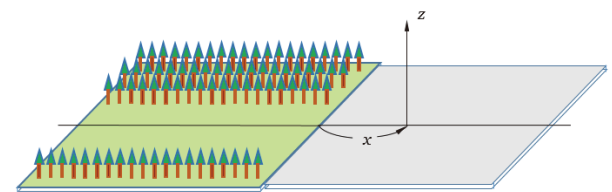


図 1b 森林に隣接する居住地の空間線量率を計算するときの森林・居住地のモデル化概念図

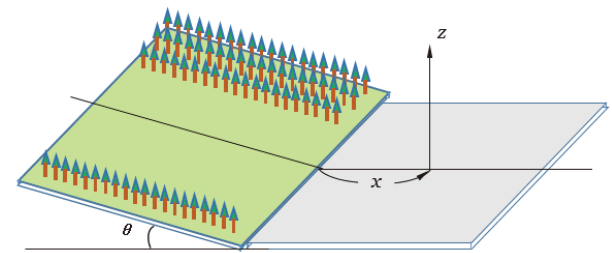


図 1c 森林斜面の傾斜角度  $\theta$  の影響を評価するときの森林・居住地のモデル化概念図

## 2.2 放射能濃度と線源スペクトル

福島第一の事故で大量に放出された放射性物質は、クリプトン、キセノンの希ガス、揮発性のヨウ素 131 ( $^{131}\text{I}$ , 半減期 8.04 日), そして, セシウム 134 ( $^{134}\text{Cs}$ , 半減期 2.062 年), セシウム 137 ( $^{137}\text{Cs}$ , 半減期 30.0 年) である[1]。これらの放射性核種の中で汚染した地域の空間線量に長期間にわたって影響を与え続ける核種は, 半減期が長い  $^{137}\text{Cs}$  である。本稿では  $^{137}\text{Cs}$  で汚染した場合について評価を行った。福島第一の事故では  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$  がほぼ同量の放射能が大気中に放出されたため, 事故時の森林内の両者の放射能濃度はほぼ同じであったと考えられる。一般に, 汚染した地域の両者の放射濃度が同じ場合,  $^{134}\text{Cs}$  を線源とする空間線量は  $^{137}\text{Cs}$  を線源とする空間線量の約 2.7 倍[18,19]と見積もることができる。従って,  $^{137}\text{Cs}$  を線源とする本稿の計算結果から  $^{134}\text{Cs}$  の放射濃度に対応する空間線量を単純な比例計算で推定することができる。

本解析で仮定した  $^{137}\text{Cs}$  の放射能濃度は, 福島第一原子力発電所から約 60km 離れた地域を想定し, 10 万  $\text{Bq}/\text{m}^2$  とした。1Bq の  $^{137}\text{Cs}$  からは,  $^{137}\text{Cs}$  が娘核種  $^{137}\text{Ba}$  の励起状態に  $\beta$  変化する比率, および励起状態から基底状態へ脱励起するときの内部転換係数等の物理的性質により, エネルギー 0.66165MeV の  $\gamma$  線が毎秒 0.85 個放出される[20,21]。空間線量は放射能濃度に比例するため, 本論文の解析結果から, 任意の  $^{137}\text{Cs}$  の放射濃度の空間線量に換算することが可能である。

## 2.3 線源分布のモデル化

環境省第 4 回環境回復検討会の文献 2 および文献 22-26 によると, 平成 23 年 8 月における川内村スギ林内の放射性物質の分布状況の調査で, 放射性セシウムは全体の 38% が樹木の葉に, 枝に 11% で樹木全体に 51%, そして, 林床の落葉部に全体の 38%, 表層土壌に 17% 存在していることが報告されている。スギ林の高さ方向の放射能濃度の分布は, 高さ 7m 以上の樹冠部に約 50%, 林床付近に約 50% 沈着していた[22,23]。また, 2011 年か 2013 年の間におけるスギ林各部位の放射性セシウム沈着量の調査で, 時間がたつとともに大部分のセシウムは林床部に移行していることが示されている[24,25]。

本解析では, 事故発生当初の放射能分布を模擬する地表から鉛直方向の線源分布として, 林床と樹冠部にそれぞれ半分ずつ沈着した分布 (地上高 0~0.2m に 50%, 地上高 0.2m~7m に 0%, 地上高 7~13m に 20%, 地上高 13~15m に 30% が一様に分

布しているとモデル化, 以下, 林床樹冠線源分布と呼ぶ), また, 平原に沈着した状況および事故発生時から時間が経過し放射能の分布が林床・下層植生部に移行した状況を模擬する線源分布 (地上高 0~0.2m に一様に放射能が分布するとモデル化, 以下, 林床線源分布と呼ぶ) の 2 種類の線源分布についてシミュレーションを行った。なお, 森林内の水平方向の線源分布は一様と仮定した。

## 2.4 モンテカルロ法による光子の輸送計算

森林内に沈着した  $^{137}\text{Cs}$  から放出される  $\gamma$  線が森林に隣接する居住地や森林内の線量率評価位置まで到達する  $\gamma$  線の輸送過程はモンテカルロ法でシミュレーションする。シミュレーションコードとして MCNP コード[27]を使用した。MCNP コードは, (1)式に示すボルツマン輸送方程式をモンテカルロ法で解き, 光子のフラックスを追う。変数およびシミュレーション方法の詳細については文献 18 (特にその付録章) とそこで参照している文献に譲り, 以下に, 本稿で行った空間線量率評価の流れを簡単に述べる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{v} \frac{\partial \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)}{\partial t} + \vec{\Omega} \cdot \nabla \phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) + \Sigma_t(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \\ &= \iint dE' d\vec{\Omega}' \Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}) \phi(\vec{r}, E', \vec{\Omega}', t) \\ &+ S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t) \end{aligned} \quad (1)$$

(1)式において,  $\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$  は時刻  $t$ , 位置  $\vec{r}$  における, エネルギー  $E$  をもち, 単位ベクトル  $\vec{\Omega}$  の方向に放出される光子の角度フラックス,  $S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$  は時刻  $t$ , 位置  $\vec{r}$  における, エネルギー  $E$  をもち, 単位ベクトル  $\vec{\Omega}$  の方向に放出される放射線の線源強度, そして,  $\Sigma_t(\vec{r}, E)$  はエネルギー  $E$  の粒子に対する位置  $\vec{r}$  における巨視全断面積,  $\Sigma_s(\vec{r}, E' \rightarrow E, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega})$  は運動エネルギー  $E'$  をもち  $\vec{\Omega}'$  方向から進んできた粒子が位置  $\vec{r}$  において散乱し, エネルギーが  $E$  となり  $\vec{\Omega}$  方向に散乱される単位立体角, 単位エネルギーあたりの巨視微分散乱断面積 である。

本シミュレーションでは, 森林内に沈着した  $^{137}\text{Cs}$  の空間分布 (2.3 節を参照) と  $^{137}\text{Cs}$  から放出される  $\gamma$  線のエネルギースペクトルを線源データ  $S(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$  として与える。線源強度は時間的に一定, 放出方向は空間的に等方と考え, 空間線量率の評価は定常固定線源問題として扱う。

注目する線量率評価地点での  $\phi(\vec{r}, E, \vec{\Omega}, t)$  を求めることにより光子のフラックスが求まる。求まった光子のフラックスに線量換算係数を乗じて評価地点での空間線量率（実効線量率） $[\mu\text{Sv/h}]$ を求める。本解析では、フラックスを評価するための粒子検出手法であるディテクタータリー (detector tally) としてポイントディテクター (point detector) を使用し、F.S.D (Fractional Standard Deviation, 相対誤差) は 0.01 前後になるように計算精度を確保した[27]。また、線量換算係数には実効線量率が安全側に評価される AP 照射条件の換算係数を使用した[28]。

### 3. 評価結果と考察

#### 3.1 森林内の空間線量率

川内村スギ林が無限に広がっている、森林斜面の傾斜角（森林斜面と水平面とのなす角度、以下、斜度と呼ぶ。図 1c を参照）が 0 度の森林を想定し、森林に降着した  $^{137}\text{Cs}$  による森林内の空間線量率を、林床線源分布と林床樹冠線源分布について評価した。森林は図 1a のようにモデル化し、計算で設定する森林領域は、空間線量率がほぼ一定となるサイズを確認し、水平方向を 1 辺 520m の正方形領域、鉛直方向を高さ 400m とした。地面からの放射線の反射を考慮するため、厚さ 20cm の土壌層[18]を設けた。空間線量率の評価位置は正方形の中央である。

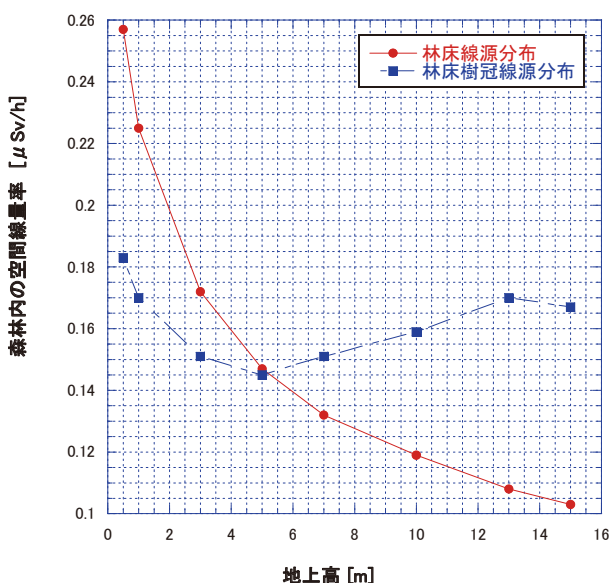


図2 森林内高さ方向の空間線量率

図2に、森林に  $^{137}\text{Cs}$  が 10 万  $\text{Bq/m}^2$  の濃度で沈着した場合の、森林内における高さ方向の空間線量率を林床線源分布と林床樹冠線源分布について示す。地上高 1m における空間線量率は、林床線源分布のとき  $0.23\mu\text{Sv/h}$ 、林床樹冠線源分布のとき  $0.17\mu\text{Sv/h}$  である。

事故時の川内村スギ林に沈着した  $^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$  をあわせた放射能濃度は約 138 万  $\text{Bq/m}^2$  であり、森林内の地上高 1m における空間線量率は  $3.1\mu\text{Sv/h}$  であった[12]。また、森林に隣接する草原での地上高 1m の空間線量率は森林内とあまり違いがなかったことが報告されている[26]。林床樹冠線源分布のシミュレーション結果を、 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$  をあわせた放射能濃度が 138 万  $\text{Bq/m}^2$  の場合に換算すると、 $^{137}\text{Cs}$  と  $^{134}\text{Cs}$  の放射能濃度はそれぞれ 69 万  $\text{Bq/m}^2$  となるため、森林内の地上高 1m における両核種からの寄与をあわせた空間線量率は約  $4.3\mu\text{Sv/h}$  と評価される。この値は、実測値に比べて高めではあるが、実測値をほぼ再現している。

図3は、地上高 7m の空間線量率に規格した、林床線源分布および林床樹冠線源分布に関する高さ方向の空間線量率の変化をスギ林内の実測値[22]と比べた結果である。林床樹冠線源分布の結果は、空間線量率が高さ方向にほぼ一定であるという実測値の特徴をよく再現している。スギ林に放射性物質が降下した場合の空間線量率評価は、高さ方向の線源分布を考慮した解析が必要であることを示している。また、林床部に線源が沈着した場合でも地上高 1~15m の範囲では森林内の空間線量率の大きさはファクター2 程度しか変化していない。この傾向は無限平面の場合と同じである[18]。

正方格子状に樹木を配置した森林モデルで林床樹冠線源分布を仮定したシミュレーションは、事故発生当時の川内村スギ林の空間線量率の実測値の特徴を再現していると考えられる。

図4は、森林領域を空気のみに変えた場合、森林領域を木々と空気均質化した場合、そして今回の森林モデルである木々を正方格子状に配置した場合の森林内高さ方向の線量率を比較した結果を示す。森林がない場合（森林領域の遮蔽物質が空気のみ）の空間線量は川内村スギ林を想定した空間線量の約 1.2 倍となり、スギ林の遮蔽効果は約 20%と評価される。遮蔽効果 ( $S_{\text{eff}}$ ) は、遮蔽材が存在しない場合の空間線量率を  $D_{\text{noShield}}$ 、遮蔽材がある場合の空間線量率を  $D_{\text{Shield}}$  として(2)式で定義する。

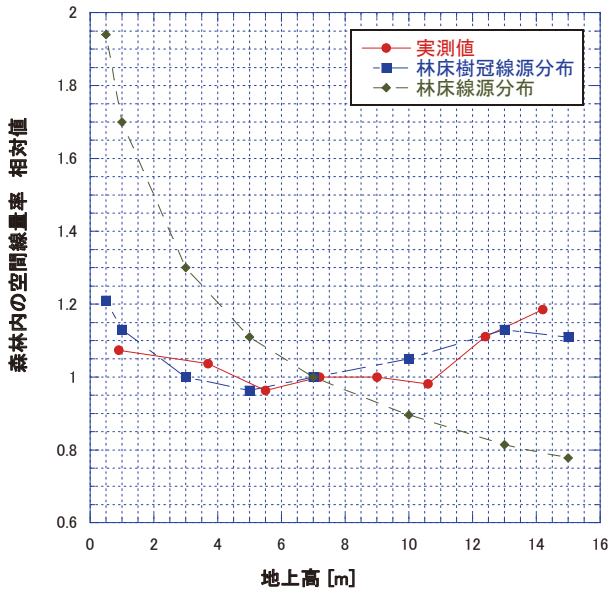


図3 地上高 7m の空間線量率に規格した場合の森林内高さ方向の空間線量率の変化

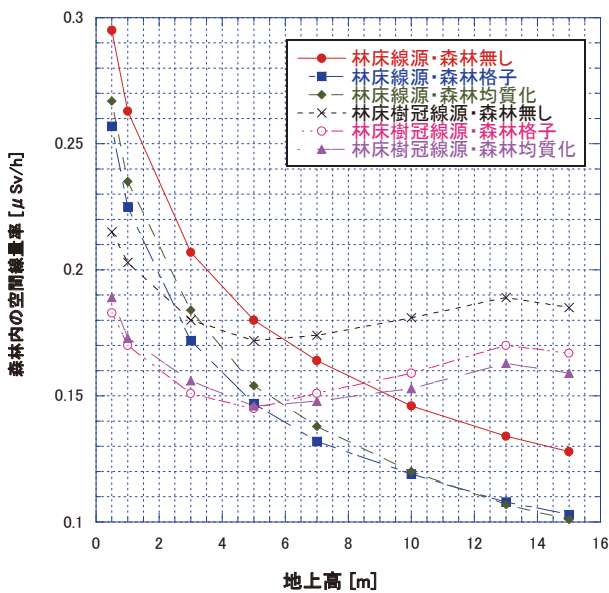


図4 森林領域に樹木がない場合、および、森林領域を樹木と空気と均質化した場合の森林内高さ方向の空間線量率

$$S_{\text{eff}} = \frac{D_{\text{noShield}} - D_{\text{Shield}}}{D_{\text{noShield}}} \times 100 \quad [\%] \quad (2)$$

地表の  $^{137}\text{Cs}$  の放射能濃度が 10 万  $\text{Bq/m}^2$  場合の平地の地上高 1m 空間線量率は約  $0.26\mu\text{Sv/h}$  [18]であるため、文献 26 で報告されているように、森林内と森林に隣接する平原の空間線量率との差は大きくない。森林領域を均質化した場合、線源領域に近い場合には格子状の配置に比べて約 5% 高めに、線源領域から離れるに従い、格子状の配

置に比べて空間線量率は低めに評価される。川内村スギ林のように木々がある間隔で生えている場合の森林内の線量率は木々を格子状に配置するモデル化がより現実的と考える。また、森林内の樹木の配置を六角格子でモデル化し、樹木の配置の仕方の違いによる空間線量率への影響を確認した。樹木の配置を六角格子でモデル化したシミュレーションの空間線量率は、正方格子の場合の値とほぼ同じとなり（地上高 1~15m の範囲で 1% 前後の違い）、樹木の配置の仕方による線量率への影響は小さいことが確認できた。

図 5a (図 5b) は林床線源分布（林床樹冠線源分布）における、森林内空間線量率への線量率評価位置周辺領域からの寄与率である。寄与率 ( $F_{\text{cont}}$ ) は、無限に広がった森林におけるある線量率評価位置の空間線量率を  $D_{\text{Inf}}$ 、同評価位置の周囲に限定した線源領域からの空間線量率を  $D_{\text{Lim}}$  として(3)式で定義する。

$$F_{\text{cont}} = \frac{D_{\text{Lim}}}{D_{\text{Inf}}} \quad (3)$$

森林内の地上高 1m における空間線量率は、半径 20~30m 内の周囲からの寄与率が、林床線源分布の場合が約 70~80%、林床樹冠線源分布の場合が約 60~70%である。図 5a と図 5b の大まかな傾向は、点減衰核法[29]に基づいて考えると、線源領域から線量評価位置までの距離が長いほど評価位置まで到達する放射線の密度は薄くなり、また、その間に遮蔽体により吸収される確率が高くなるという理由で説明できる。林床線源の場合は線量率評価位置の高さとともに寄与率が減少しているが、林床樹冠線源分布の場合には、寄与率の高さ方向の変化は小さい。林床樹冠線源分布では林床部と樹冠部にほぼ半々に線源が分布しているためである。

なお、前述したように、無限平面に沈着した場合の寄与率は約 80~85%の寄与となっている[16-18]。森林内の寄与率は森林の遮蔽により平地に比べて小さくなっている。森林の除染による空間線量率の減少効果を検討する際には、ここに示した寄与率を考慮する必要がある。

### 3.2 森林内広場の空間線量率

無限に広がった森林内にキャンプ場など樹木が伐採された広場を想定し、森林に囲まれた広場における空間線量率を評価した。広場は、図 1a に示す 1 辺 520m 正方形の森林の中央に、図 6 のような 1 辺 100m 四方の正方形の広場があるとモデル化した。除染前の広場の線源分布は林床線源

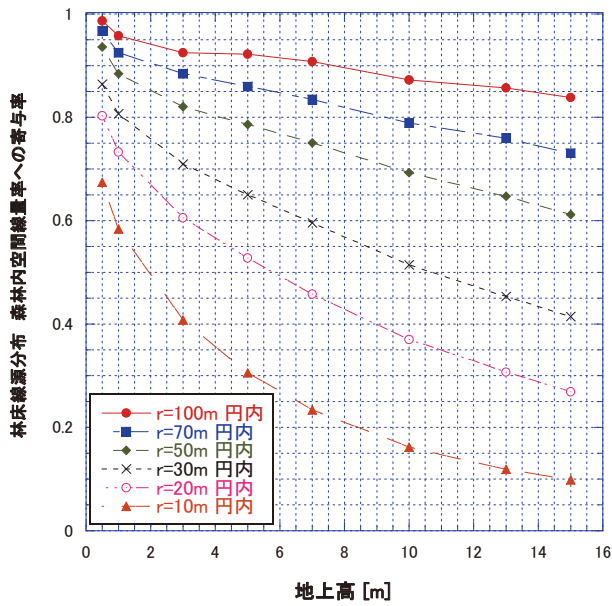


図 5a 林床線源分布における森林内空間線量率に占める評価地点周辺領域からの寄与率

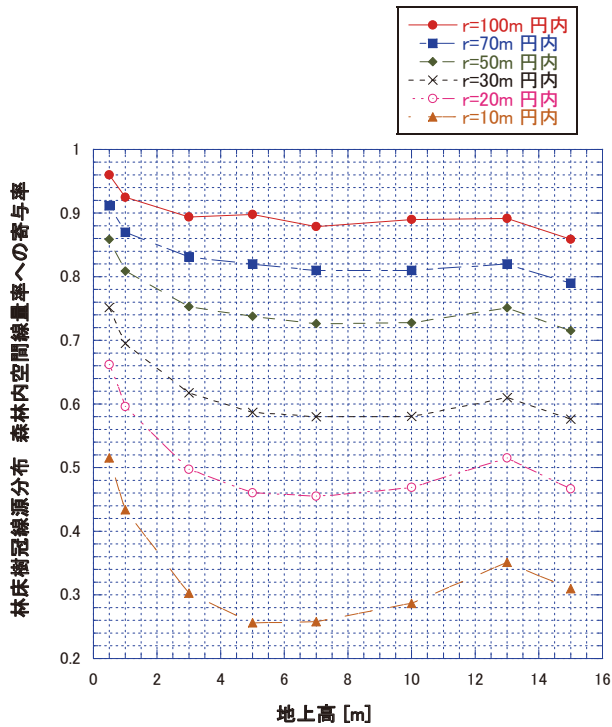


図 5b 林床樹冠線源分布における森林内空間線量率に占める評価地点周辺領域からの寄与率

分布とし、広場を囲む森林の線源分布が、林床線源分布と林床樹冠線源分布の場合について、広場の除染前・除染後で空間線量率を評価した。広場の除染は、図 6 に示す広場中央を中心とする半径 71m 範囲内を完全除染する場合とした。

図 7a (図 7b) は、広場を囲む森林の線源分布が林床線源分布 (林床樹冠線源分布) の場合に対

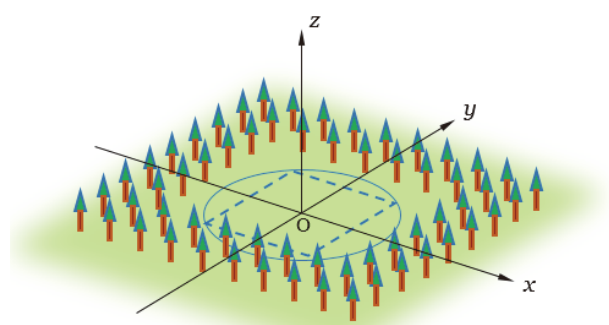


図 6 森林内の広場 (点線内の領域) と除染範囲を広場中央を中心とし円内とするモデル化概念図

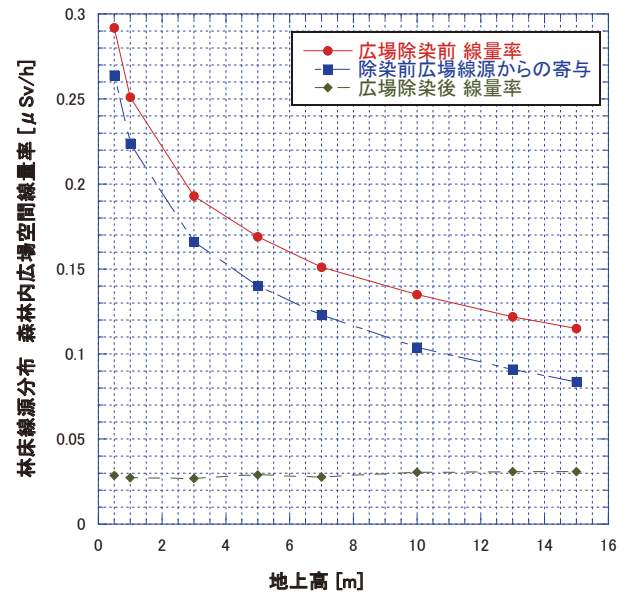


図 7a 林床線源分布における森林内広場中央・高さ方向の空間線量率

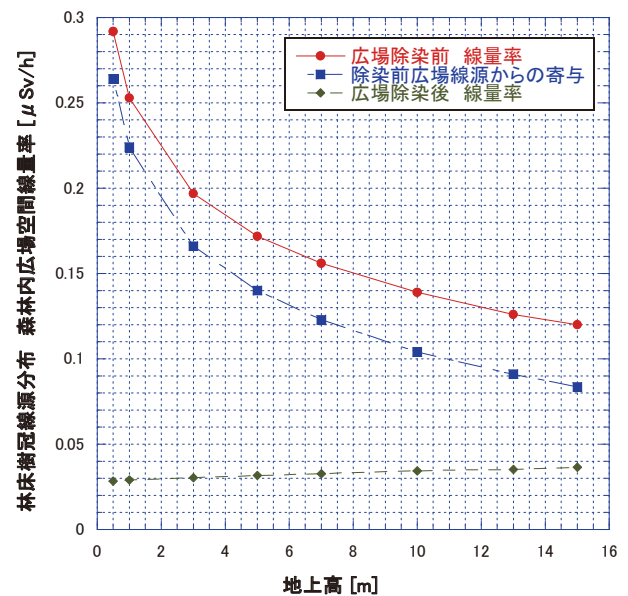


図 7b 林床樹冠線源分布における森林内広場中央・高さ方向の空間線量率

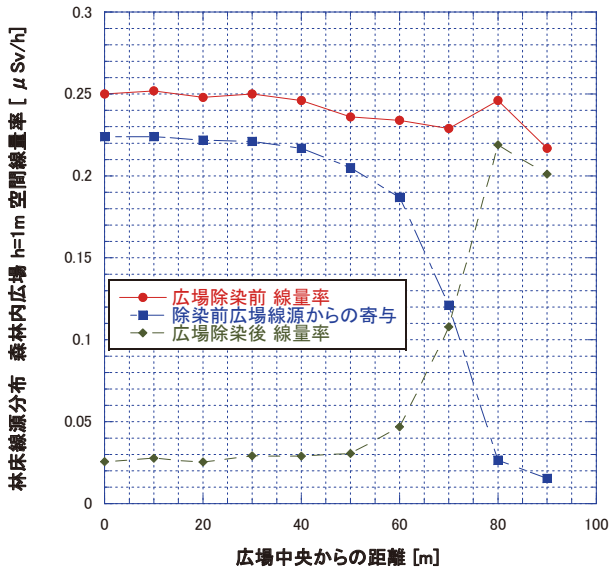


図 8a 林床線源分布における森林内広場地上高 1m における広場中央から水平方向の空間線量率

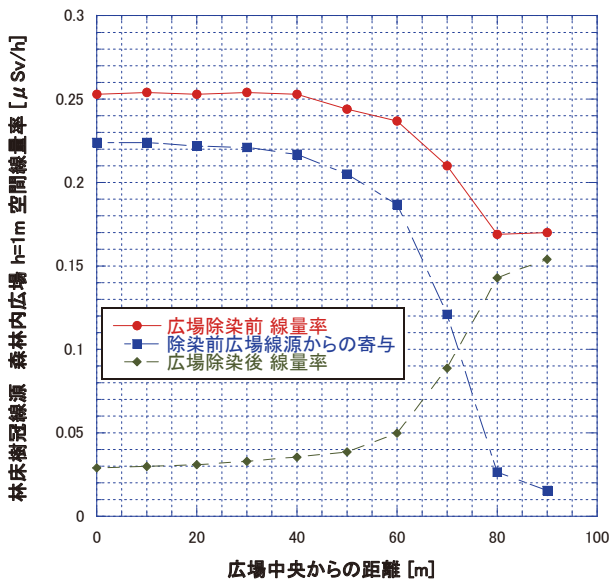


図 8b 林床樹冠線源分布における森林内広場地上高 1m における広場中央から水平方向の空間線量率

する、広場中央での高さ方向の空間線量率である。広場を除染する前の高さ方向の線量率の変化は、どちらの線源分布においても、広場に降着した広場自身の線源からの寄与が大部分であり、周辺の森林からの寄与が小さいことを示している。従って、森林の線源分布の違いの影響も小さい。

広場を完全に除染した場合の広場中央の空間線量率の高さ方向の変化はなくほぼ一定となっている。線源分布が林床線源分布の場合が

0.027 $\mu$ Sv/h、林床樹冠線源分布の場合が 0.029 $\mu$ Sv/h である。広場を完全に除染したときの広場中央の空間線量は、除染前の約 1/10 まで減少している。

図 8a (図 8b) は、森林の線源分布が林床線源分布 (林床樹冠線源分布) のときの地上高 1m における、広場中央を中心とした半径 71m の範囲の除染前後の、広場中央から森林の境界方向への空間線量率の変化である。広場全体の空間線量率は、広場中央の値とほぼ等しく、除染前は約 0.25 $\mu$ Sv/h、除染後は林床線源分布の場合が 0.027 $\mu$ Sv/h、林床樹冠線源分布の場合が 0.029 $\mu$ Sv/h である。今回評価した広場の線量率に対して森林の影響が大きく現れるのは森林境界近くだけであるが、3.1 節で述べた線量評価位置周囲の森林からの寄与率を考えると、半径 20m 以下の狭い広場の空間線量率には、広場周囲の森林からの影響は大きいと考えられる。

### 3.3 森林に隣接する居住地の空間線量率

放射能で汚染した森林に隣接する居住地の森林境界周辺の空間線量率をシミュレーションした。森林として川内村スギ林を想定し、森林内の放射能分布として林床線源分布と林床樹冠線源分布の 2 種類を仮定した。シミュレーションでは、森林斜面の斜度の影響や林縁周辺の森林を除染した場合の効果について検討を行った。計算は、図 1b および 1c のようにモデル化を行い、1 辺 520m の正方形の森林領域とその領域に隣接する 1 辺 500m の正方形の居住地を仮定した。

図 9a (図 9b) は、斜度 0 度の森林に隣接する居住地の空間線量率の林縁からの距離依存性を、林床線源分布 (林床樹冠線源分布) について示したものである。両線源分布とも、空間線量は林縁から 5m までに急減するが、5m 以上では、空間線量率は林縁からの距離とともに緩やかに減少し、0.05 $\mu$ Sv/h $\sim$ 0.02 $\mu$ Sv/h となり林縁での値の約 1/3 $\sim$ 1/5 である。また、少なくとも地上高 1 $\sim$ 5m の範囲では空間線量率の大きさはほぼ同じである。林縁付近の空間線量率には林縁付近の森林からの寄与が大きいが、林縁から 10m 以上離れると森林の広い領域から寄与が大きいと言える。林縁付近の居住地の空間線量率は、林床樹冠線源分布に比べて、林床線源分布のほうが約 20% 程度高めであるが、林縁から 5m 離れると線源分布の違いの影響は小さく、ほぼ同様な減衰傾向を示している。

図 10a (図 10b) は、斜度 0 度の森林における、隣接居住地地上高 1m、3m、および 5m での空間線量率に対する森林自身の遮蔽効果  $S_{\text{eff}}$  の林縁からの距離依存性を、林床線源分布 (林床樹冠線源

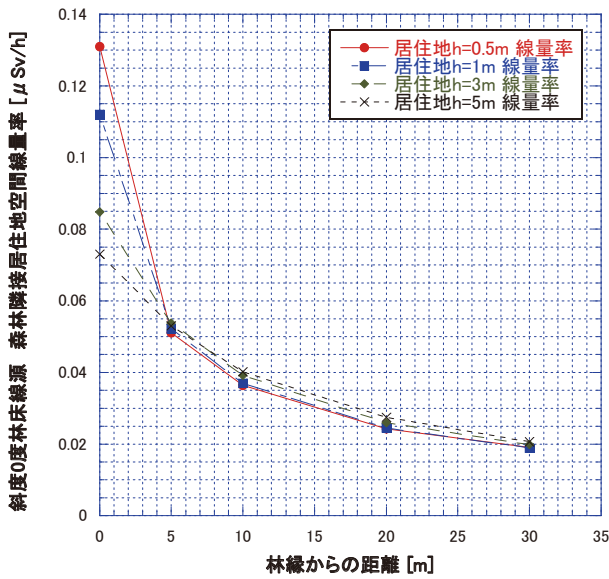


図 9a 林床線源分布における斜度 0 度森林に隣接する居住地森林境界周辺の空間線量率

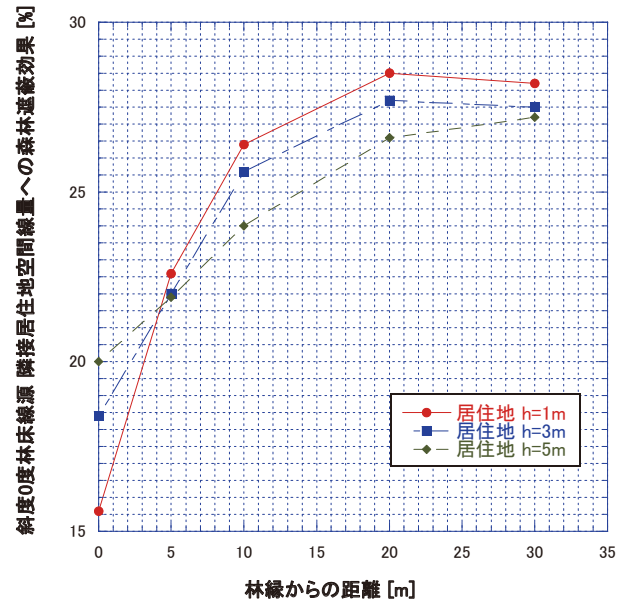


図 10a 林床線源分布における斜度 0 度森林に隣接する居住地森林境界周辺の空間線量率に対する森林の遮蔽効果

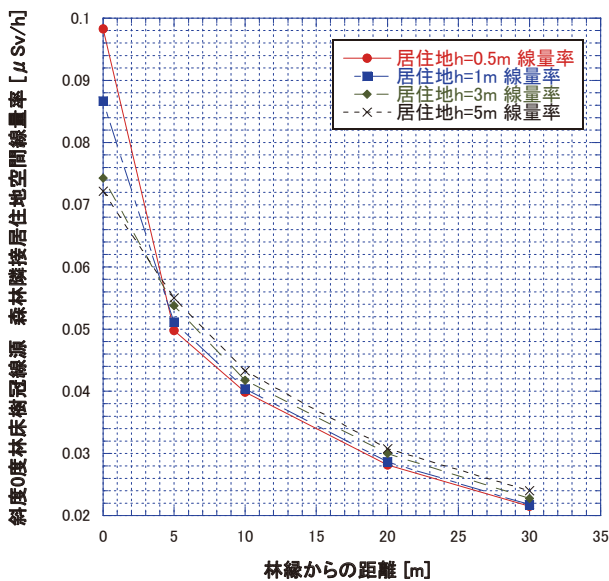


図 9b 林床樹冠線源分布における斜度 0 度森林に隣接する居住地森林境界周辺の空間線量率

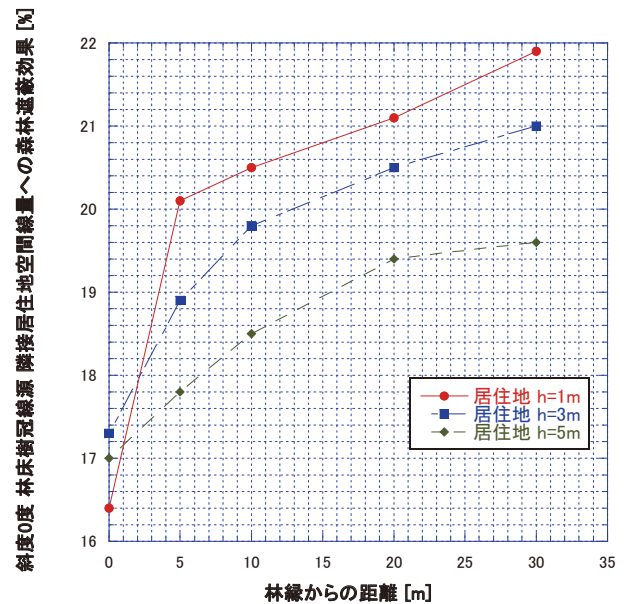


図 10b 林床樹冠線源分布における斜度 0 度森林に隣接する居住地森林境界周辺の空間線量率に対する森林の遮蔽効果

分布) において求めた結果である。林縁から 5m 離れた地点の空間線量率に対し、森林の遮蔽効果は林床線源分布が 25%前後、林床樹冠線源分布が 20%前後となっている。林床樹冠線源分布に比べ、森林の遮蔽効果は林床線源分布の方が約 5%大きい。この傾向は、林床線源分布の場合は林床樹冠線源分布に比べて線量評価位置に放射線が到達するまでに森林部を横切る距離が長くなるためと考えられる。また、林床樹冠線源分布において

は、評価位置が高いほど森林の遮蔽効果が小さい。これは樹冠部から線量評価位置までの距離は地上から高いほど森林部を横切る距離が短くなり、遮蔽効果が小さくなるためと考えられる。

図 11a (図 11b) は、斜度 0 度および 20 度の森林について、隣接居住地の林縁から 5m, 10m 離れた位置における高さ方向の空間線量率を、林床線源分布 (林床樹冠線源分布) について示した図

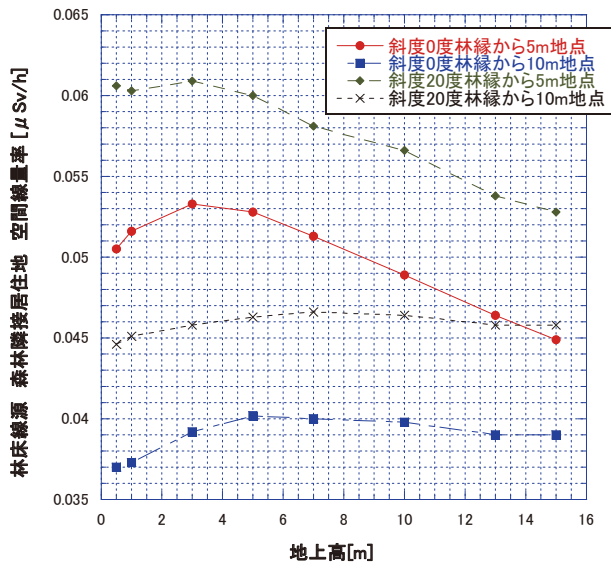


図 11a 林床線源分布における斜度 0 度，20 度の森林に隣接する居住地森林境界周辺の高さ方向空間線量率

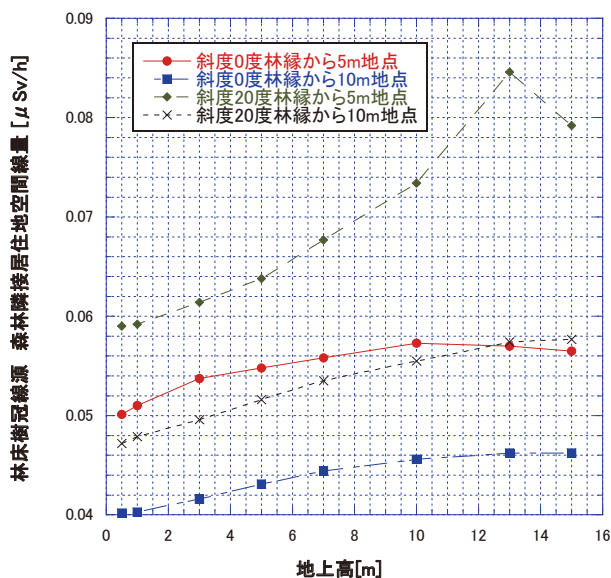


図 11b 林床樹冠線源分布における斜度 0 度，20 度の森林に隣接する居住地森林境界周辺の高さ方向の空間線量率

である。斜度 0 度の場合，林床線源分布（林床樹冠線源分布）における地上高 1m における空間線量率は，林縁から 5m の位置で  $0.052\mu\text{Sv/h}$  ( $0.051\mu\text{Sv/h}$ )，林縁から 10m の位置で  $0.037\mu\text{Sv/h}$  ( $0.040\mu\text{Sv/h}$ ) であるが，図 11a の赤丸曲線，青四角曲線，および，図 11b の赤丸曲線，青四角曲線が示すように，地上 15m の範囲内の高さ方向の空間線量率の変化は小さく（10%程度），また，林床樹冠線源分布の方が林床線源分布に比べて 10%程度高い。さらに，斜面の斜度が大きい方が

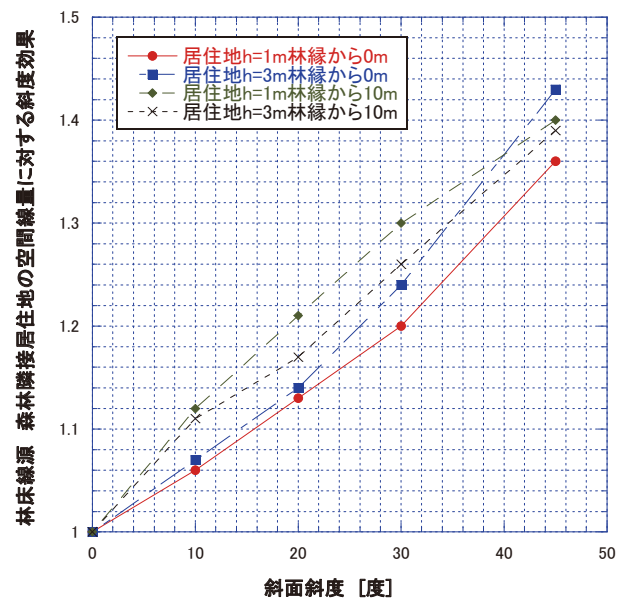


図 12a 林床線源分布における森林に隣接する居住地森林境界周辺の空間線量率に対する森林斜面の斜度の影響

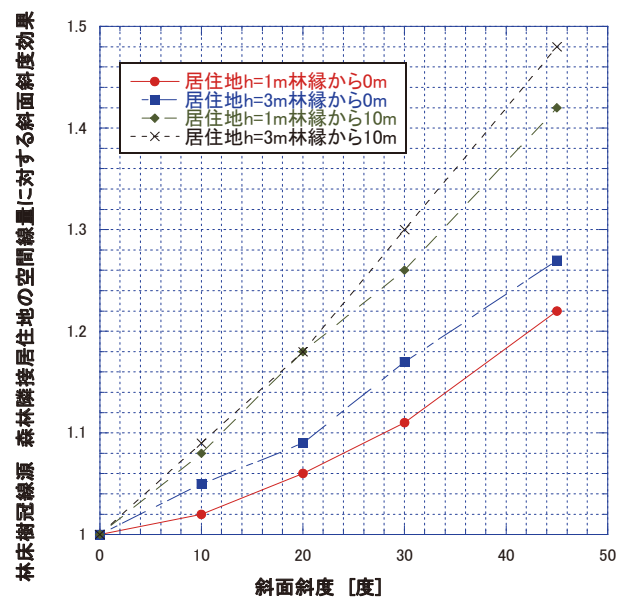


図 12b 林床樹冠線源分布における森林に隣接する居住地森林境界周辺の空間線量率に対する森林斜面の斜度の影響

空間線量率は高く，林床線源分布の場合は高さ方向の変化の傾向は斜度によらずおおむね同じ傾向を示している。

図 11b において，斜度 20 度の場合の林縁から 5m 地点では，高さ方向の線量率が高さ 13m 付近まで増加し，その後は減少する傾向を示している。林縁近くの空間線量率には林縁付近の森林からの寄与が大きく，また，斜度があるため，評価位置の高度が高いほど森林の樹冠部に近づき，樹冠

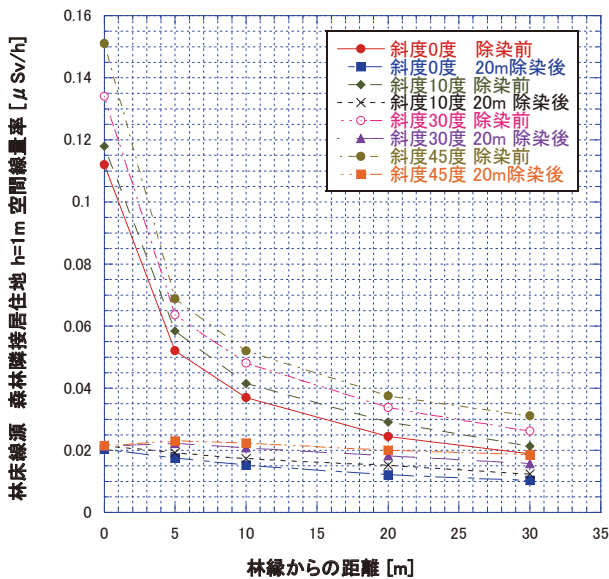


図 13a 林床線源分布における林縁から 20m の範囲を完全に除染した場合の除染前と除染後の森林に隣接する居住地地上高 1m における空間線量率

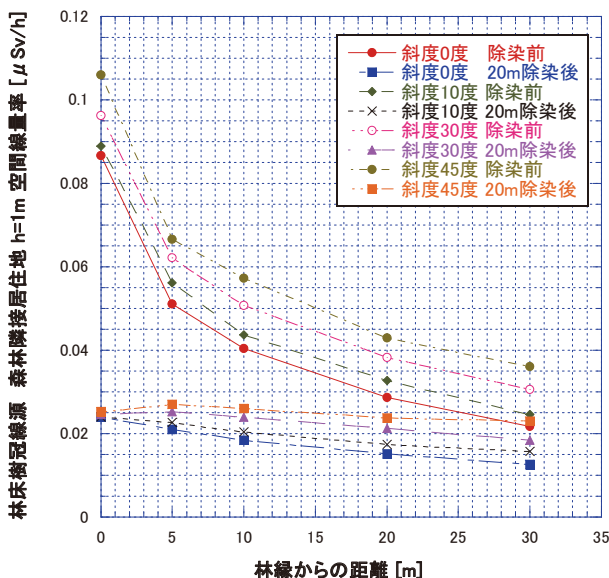


図 13b 林床樹冠線源分布における林縁から 20m の範囲を完全に除染した場合の除染前と除染後の森林に隣接する居住地地上高 1m における空間線量率

部からの寄与が高度とともに増大する。さらに高度が増すと、線量率に寄与する森林領域の樹冠部から遠ざかることになり、その結果、線量率への寄与が次第に減少することになるためと考えられる。

図 12a (図 12b) は、森林に隣接する居住地の空間線量率に及ぼす森林斜面の斜度の影響を、林

床線源分布 (林床樹冠線源分布) について評価した結果である。図中の斜度効果は、各斜度で評価した居住地の空間線量率を同じ評価位置の斜度 0 度での空間線量率で除した値である。斜度が大きいほど、森林に隣接する居住地の空間線量は高くなっている。この傾向は、線源領域から線量率評価位置までの直線距離が一般に斜度が大きくなるほど短くなり、その間の放射線の吸収による減衰も小さくなる。その結果、評価位置に到達する放射線が多くなるためと考えられる。斜度が大きいほど、隣接居住地の空間線量率が大きくなることは文献 6 においても報告されている。

### 3.4 隣接居住地の空間線量率に対する森林の除染効果

平成 24 年 7 月の第 5 回環境回復検討会で示された森林除染に関する基本方針では、森林の除染は林縁から 20m 程度の範囲を目安にすることが述べられている。林縁付近の放射能を完全に除染した場合の除染効果をシミュレーションした。なお、ここで示す結果は特に断らない限り、居住地側は完全に除染されているという仮定で解析した結果である。

図 13a (図 13b) は、林床線源分布 (林床樹冠線源分布) において、林縁から 20m の範囲の森林内の放射線源を完全に除去した場合 (遮蔽体は存在するが、放射線源は存在しない) の、森林に隣接する居住地の空間線量率を除染前と除染後と比較した結果である。除染前は森林の斜度が大きいほど、また、林縁に近いほど森林に隣接する居住地の空間線量率が高いが、林縁から林内 20m を除去した場合には、両線源分布とも林縁から 30m 以内の住宅地では 0.02μSv/h 程度まで減少している。

図 14a (図 14b) は、林縁から林内 20m の除染をした場合の林床線源分布 (林床樹冠線源分布) における、森林に隣接する居住地地上高 1m に対する除染効果の、空間線量評価位置の林縁からの距離と森林斜面の斜度依存性を示した図である。除染効果は斜度による大きな違いはなく、林縁に近いほど除染効果は大きい。なお、除染効果 ( $E_{\text{Decon}}$ ) は、除染前の空間線量率を  $D_{\text{noDecon}}$ 、除染実施後の空間線量率を  $D_{\text{Decon}}$  として (4) 式で定義する。

$$E_{\text{Decon}} = \frac{D_{\text{noDecon}} - D_{\text{Decon}}}{D_{\text{noDecon}}} \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

林床線源分布に対応する文献 6 のシミュレーション結果は、林縁の空間線量率に対する除染効果

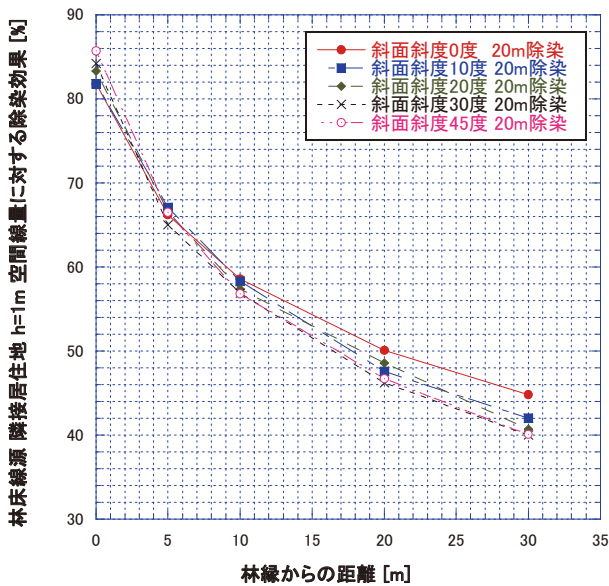


図 14a 林床線源分布における林縁から 20m の範囲を完全に除染した場合の隣接居住地森林境界周辺地上高 1m の空間線量率に対する除染効果

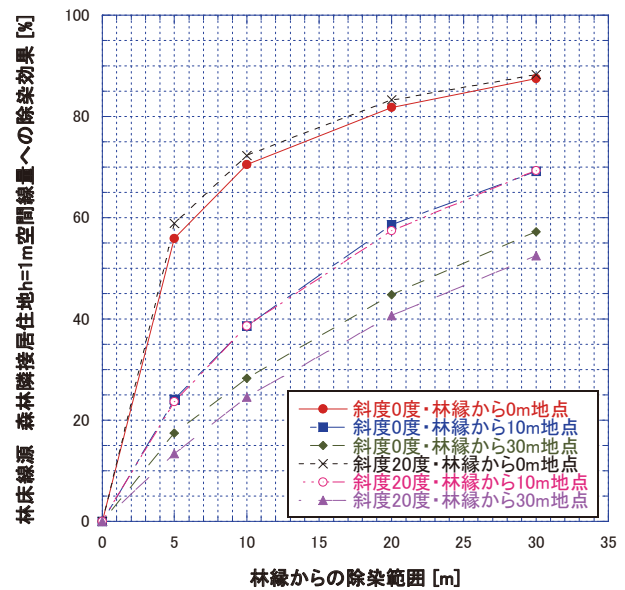


図 15a 林床線源分布における隣接居住地森林境界周辺地上高 1m の空間線量率に対する林縁からの除染範囲と除染効果の関係

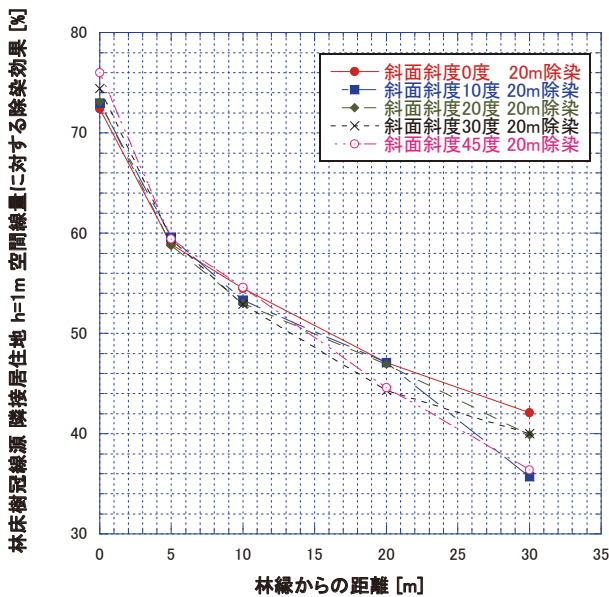


図 14b 林床樹冠線源分布における林縁から 20m の範囲を完全に除染した場合の隣接居住地森林境界周辺地上高 1m の空間線量率に対する除染効果

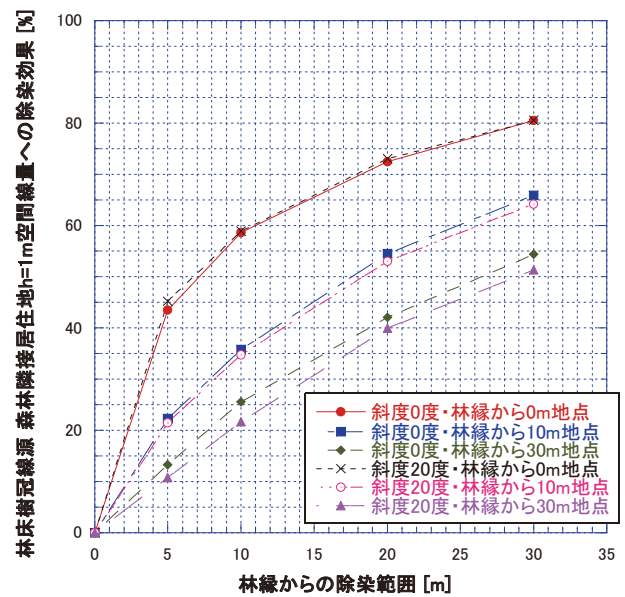


図 15b 林床樹冠線源分布における隣接居住地森林境界周辺地上高 1m の空間線量率に対する林縁からの除染範囲と除染効果の関係

が斜度や評価位置の高さによらないこと、林縁から 20m の除染で除染効果が約 20%であることを報告している。また、除染実証試験でも除染の効果は 30～40%であることが報告されているが[2,8,25]、除染を実施した領域外からの空間線量率への寄与について言及はない。

本計算では、林縁地上高 1m の評価地点の除染効

果は約 80%である。林床線源における森林内の高さ 1m の空間線量率に対する半径 20m の範囲からの寄与が約 70%であることを考慮すると文献 6 の数値は小さい。文献 6 で報告されている居住地の空間線量には居住地に降着した線源からの寄与が含まれていると考えられる。

もし居住地や周辺から、例えば居住地完全除染下での林縁計測線量率の 3 倍の寄与があると、本

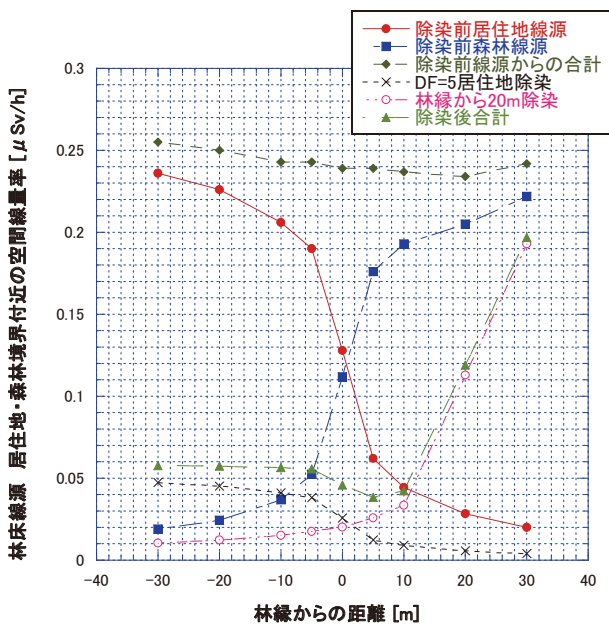


図 16a 林床線源分布における隣接居住地森林境界周辺地上高 1m の空間線量率に対する除染実施前後の居住地・森林残留放射能からの寄与

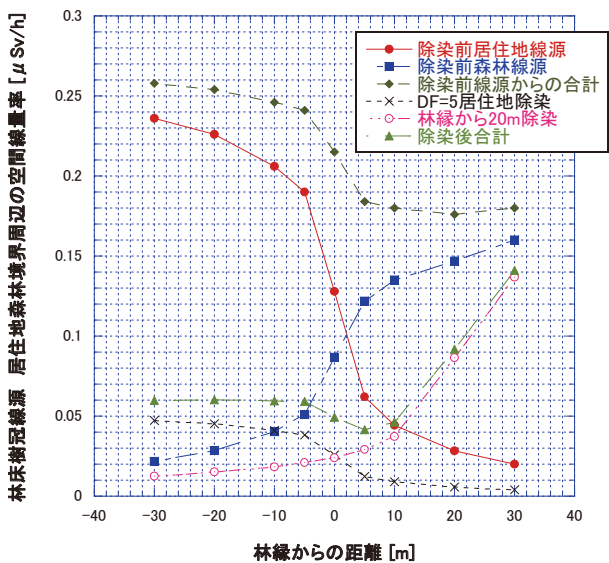


図 16b 林床樹冠線源分布における隣接居住地森林境界周辺地上高 1m の空間線量率に対する除染実施前後の居住地・森林残留放射能からの寄与

計算モデルを基に推定される森林除染効果林縁値は 50%に低減することが例示される。

森林に隣接する居住地に放射能が残留している場合の森林境界周辺の空間線量率については後述する。

図 15a (図 15b) は林床線源分布 (林床樹冠線源分布) における、森林内側の除染範囲を林縁か

ら 5m, 10m, 20m, 30m と拡大していった場合の、森林に隣接する林縁から 0m, 10m, 30m 離れた居住地の地上高 1m の空間線量率に対する除染効果である。林縁から 0m の位置では除染範囲が 20m 当たりで減衰率は 80% (70%) となり、減衰の効果は次第に緩やかになっている。これは、前に述べたように、林縁付近居住地の森林からの空間線量の寄与の多くはもともと林縁付近の森林領域からのためである。図には斜度が 0 度と 20 度の場合について示してあるが、前述したように、斜度 0 度と 20 度では、空間線量率の減衰率の大きさ、変化の傾向にあまり差はない。

図 16a (図 16b) は、林床線源分布 (林床樹冠線源分布) において、居住地・森林で除染が実施されていない場合と、居住地において除染係数 DF (Decontamination Factor) 5 (除染後に  $^{137}\text{Cs}$  の濃度が元の放射能濃度の 20%の状態) で除染が実施され、かつ林縁から 20m の範囲の森林内 (斜面斜度 0 度) の放射線線源が完全に除染されたとした場合の、林縁周辺地上高 1m における空間線量率の林縁からの距離依存性を示す。除染前の居住地の線源分布は、 $^{137}\text{Cs}$  が 10 万  $\text{Bq}/\text{m}^2$  の放射能濃度で地表面に一様に分布すると仮定した。林縁から正方向が森林内、負方向が居住地内である。先に述べたように、林縁から 20m の範囲の森林を完全に除染した場合、林縁付近の居住地空間線量に占める森林線源からの寄与は約 80%減少するが、林縁付近の空間線量率は居住地に残留する放射能濃度に大きく影響される可能性があり、このときには森林の除染効果は期待される値より小さく見える。ここに示した例では、居住地も森林も除染した場合には、林縁地上高 1m の空間線量率に対する除染効果は、両線源分布とも約 80%であるが、居住地の除染が実施されず、林縁から 20m の範囲の森林の除染のみが完全に行われた場合には、林床線源分布で約 38%、林床樹冠線源分布で約 29%となる。

### 3.5 森林の植生と森林の遮蔽性能との関係

川内村スギ林 (立木密度 1500 本/ha, 平均樹高 15m, 平均直径 20cm) を基準に、森林の植生 (立木密度, 平均樹高, 平均直径) や森林のモデル化の仕方が、森林に隣接する居住地の空間線量率に対して、森林自身の遮蔽性能の評価にどのように影響するかを比較した。

比較は、①川内村スギ林を正方格子状にモデル化した場合、②川内村スギ林と同じ立木密度 1500 本/ha であるが、樹木の大きさが平均樹高 20m, 平均直径 30cm である森林を正方格子状にモデル

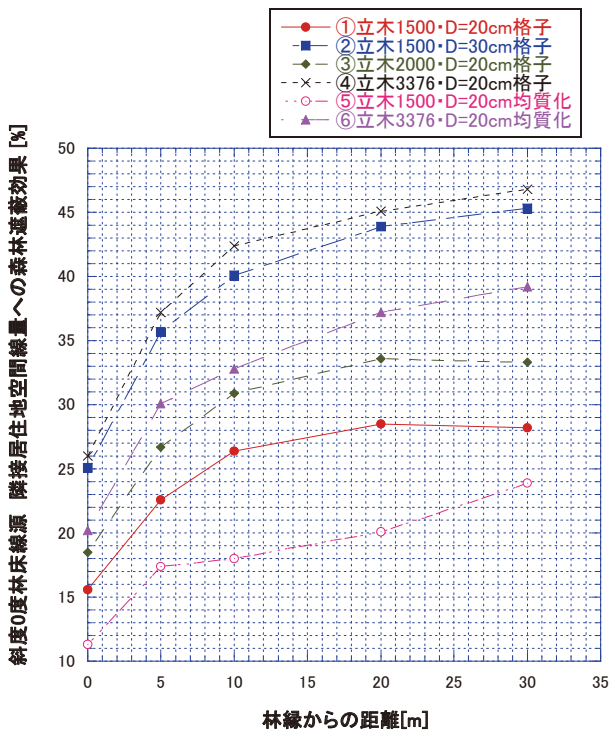


図 17a 林床線源分布における隣接居住地森林境界周辺地上高 1m 空間線量率に対する森林の植生状況・モデル化の影響

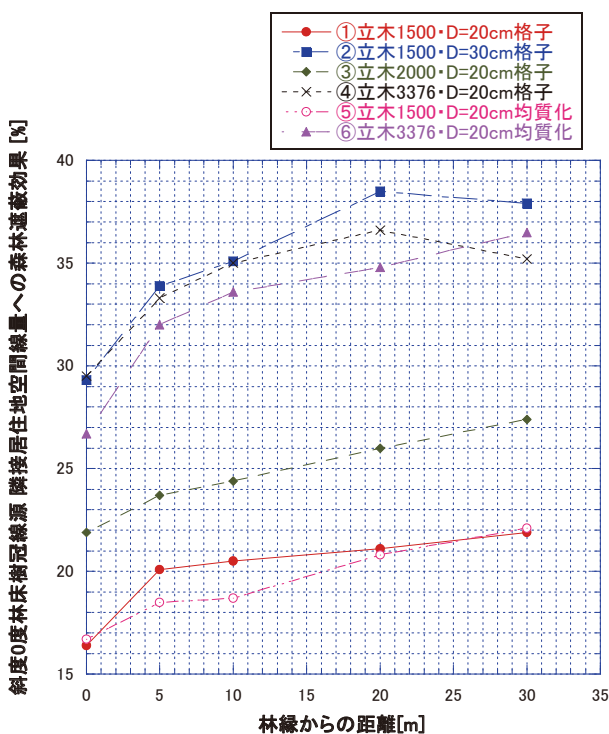


図 17b 林床樹冠線源分布における隣接居住地森林境界周辺地上高 1m 空間線量率に対する森林の植生状況・モデル化の影響

化した場合、③川内村スギ林より立木本数が多い立木密度 2000 本/ha で平均樹高 15m, 平均直径 20cm の森林を正方格子状にモデル化した場合、④樹木がさらに密生し立木密度 33376 本/ha, 平均樹高 15m, 平均直径 20cm の森林を正方格子状にモデル化した場合、および、⑤川内村スギ林①の植生状況で森林領域を樹木と空気均質化（密度  $0.0022 \text{ g/cm}^3$ ）した場合、⑥④の植生状況の森林領域を均質化（密度  $0.0034 \text{ g/cm}^3$ ）した場合（②の植生状況の森林を均質化した場合もこの密度になる）の 6 ケースについて行った。

図 17a（図 17b）は林床線源分布（林床樹冠線源分布）を仮定した場合の林縁周辺居住地地上高 1m の空間線量率に対する森林自身の遮蔽効果に関する 6 ケースの結果である。川内村スギ林を想定した森林による空間線量率の減衰効果は、林縁から 10m~30m 離れた居住地において、森林がない場合の約 28%（約 21%）である。樹木と空気を均質化したモデルでは、正方格子状に樹木を配置した場合に比べて空間線量率は高めに評価される。空間線量率評価位置近傍の線源からの寄与が大きい場合には、森林を均質化したモデルよりも樹木が間隔をあけて生えている現実的な構造を反映すべきである。立木密度、樹木の直径を変化させた場合で比較してみると、森林のバルクな遮蔽効果は樹木と空気を混合し均質化した場合の物質の密度に依存しており、減衰効果は密度にほぼ比例している。

#### 4. まとめ

2011 年 3 月の福島第一炉心溶融事故により大量の放射性物質が大気中に放出され、福島県を中心とする東日本の広い森林地帯が放射能で汚染された。汚染の影響は現在も続き、主な放射線源は半減期が約 30 年の  $^{137}\text{Cs}$  である。平成 24 年 9 月の環境省・第 7 回環境回復検討会[5]は、森林をエリア A（森林に隣接する居住地）、エリア B（森林内で人間の活動が想定される場所）、およびそれ以外のエリア C の 3 つに区分し、エリア A とエリア B の森林除染を優先的に進める方針を示した。また、平成 25 年 8 月の第 9 回環境回復検討会[6]では、エリア C の森林における放射性物質対策に関して今後の方向性・課題が整理された。現在、森林の除染は居住地に隣接する森林において、林縁付近 20m の範囲を目安に実施されている。森林内の放射性セシウムの分布状況が調査され、除染作業の実証事業が行われ、汚染の実態把握が進んできた現段階で、本稿では環境回復検討会から公開

された調査結果, 実証試験結果・シミュレーション結果のデータを使用し,  $^{137}\text{Cs}$  を線源とする汚染された森林からの空間線量率を,  $\gamma$  線に関する輸送方程式をモンテカルロ法で解析し, 森林が放射能汚染した場合の森林を放射線源とする森林内および森林に隣接する居住地における空間線量率分布の特徴, 森林の斜度の影響, 森林を除染した場合の空間線量率の低減効果, および, 空間線量率に対する森林の遮蔽効果について検討を行った。

解析対象の森林として, 森林内の放射能分布・空間線量が実測され, 森林の植生も詳細に調査されている川内村スギ林を選び, 報告資料に基づきシミュレーションのための放射能線源分布, 森林のモデル化を行った。主な結果を以下に示す。

森林内の高さ方向の空間線量率を解析し, 実測データと比較することによりモデル化の妥当性を確認した。シミュレーション結果は, 地上高 1~15m 範囲で空間線量がほぼ一様となっている実測値の傾向, および, 空間線量率の絶対値をほぼ再現した。スギ林のような常緑樹の森林に放射能が降着した場合の線量評価では, 線源領域として樹冠部分を考慮しなければならないといえる。また, 森林内の空間線量率に占める線量評価位置周辺からの寄与 (3 式参照) および森林自身の遮蔽効果 (2 式参照) を評価した。地上高 1m の空間線量率に占める評価位置を中心とした半径 20~30m の範囲からの寄与は約 70% 前後であった。森林を除染効果を検討する場合には, 線量評価位置周辺の放射線源から寄与率は重要な因子であると考ええる。また, 森林内の空間線量率は, 森林がない場合の空間線量率に比べて森林自身の遮蔽効果により約 20% 小さい。

森林中央に位置する 1 辺 100m 四方の広場 (エリア B を想定) を仮定し, 広場の空間線量率を, 広場を除染する前後の場合について解析した。森林との境界を除く広場の広い範囲の空間線量率は, 広場に降着した広場内の放射線線源からの寄与が大部分であり, 広場を囲む森林からの寄与は小さい。従って, 広場を除染することによる広場の空間線量率の低減効果は大きいといえる。

川内村スギ林に隣接する居住地の空間線量率を解析し, 空間線量率の林縁からの距離依存性および地上高依存性, そして, 森林斜面の斜度依存性を評価した。林縁から 5m 離れた居住地の空間線量率は林縁の空間線量率の約 1/3~1/5 まで急減し, 林縁から 5m 以上離れると距離とともに緩やかに減少する。林縁近くでの空間線量率に占める周辺の森林線源からの寄与は大きい, 林縁から

離れるに従い寄与が小さくなるためと考えられる。また, 高さ方向の空間線量率の変化は, 解析した地上高 15m までの範囲では地上高 1m の値とたかだか 10% 程度の違いしかなく, 空間線量率は高さ方向にほぼ一定であった。なお, 森林斜面の斜度が大きくなるに従い, 居住地の空間線量率は高くなる傾向を示す。これは, 斜度が大きくなるにつれ, 線量率に寄与する放射線線源領域から居住地の線量評価点までの距離が一般に短くなるためと考えられる。

森林に隣接する居住地での空間線量率に対する森林を除染効果を, 除染する範囲を林縁から 30m まで順次広げ, 完全に放射線線源を除去した場合について評価した。林縁の地上高 1m における居住地の空間線量率に対する除染効果 (4 式参照) は, 林内の除染範囲が林縁から 20m までで 80% 程度まで増大する。しかし, 除染範囲が 20m を超える除染効果の増加の仕方は緩やかになる。林縁からの除染範囲が同じ場合, 除染効果は斜面の斜度によらずほぼ一定であった。森林を除染効果に関して得られたこれらの傾向は, 文献 6 の報告内容と一致する。

最後に, 森林のモデル化による隣接する居住地の空間線量率の解析結果への影響を検討した。森林内の樹木が一般にある間隔を空けて生えていることを考慮し樹木を格子状に配置したモデルと森林内の樹木と空気を一様に混合し均質化したモデルでの空間線量率の比較では, 線源領域に近い場所の空間線量率は格子状モデルに比べて均質化モデルの方が高め (森林の遮蔽効果が小さめ) に評価される。林縁付近の居住地の空間線量率には, 林縁近くの森林線源領域からの寄与が大きいことを考えると, 線量率評価は樹木が間隔を空けて生えている現実を反映した, 樹木を格子状に配置したモデルで行うべきと考ええる。

本稿で報告したシミュレーション結果は, 放射能で汚染した森林に起因する被ばく線量を推定し, また, 森林を除染を検討する際の基礎的な情報であると考ええる。

## 参 考 文 献

- [1] 東京電力株式会社, “福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気中への放出量の推定について”, 平成 24 年 5 月。
- [2] 環境省・環境回復検討会 (第 4 回), “資料 4-1 森林内の放射性物質の分布状況及び分析結果

- について（中間とりまとめ） 別添1 森林内の放射性物質の分布状況の概要について”，平成24年7月9日。
- [3] 環境省・環境回復検討会（第4回）資料4-2，“森林における放射性物質の除去及び拡散抑制等に関する技術的な指針（参考資料）”，平成24年7月9日。
- [4] 環境省・環境回復検討会（第5回），“資料3 森林除染の全体像と本日の論点”，“資料5 落葉・落枝等の除去の方法”，“資料9 森林除染の考え方の整理（案）”，平成24年7月31日。
- [5] 環境省・環境回復検討会（第7回），“資料3 今後の森林除染のあり方に関する当面の整理について（案）”，平成24年9月19日。
- [6] 環境省・環境回復検討会（第9回），“資料5 森林除染に係わる知見の整理等について”，平成25年8月27日。
- [7] 環境省・環境回復検討会（第10回），“資料5-1 除染関係ガイドライン（森林部分）の見直しについて”，平成25年12月26日。
- [8] 環境省・環境回復検討会（第16回），“資料2 フォローアップ除染の考え方について”，“資料3 森林の実証事業について（中間報告）”，“資料5 森林における放射性物質対策の方向性について”，平成27年12月21日。
- [9] IAEA, “Summary Report of the Preliminary Findings of the IAEA Mission on remediation of large contaminated areas off-site the Fukushima Dai-ichi NPP 7-15 October 2011, Japan”, NF/NEFW/2011 14.October 2011, “Final Report The Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-site the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Tokyo and Fukushima Prefecture, Japan 14-21 October 2013”, NF/NEFW/2013 23.01. 2014.
- [10] 日本学術会議・農学委員会・林学分科会報告，“福島原発事故による放射能汚染と森林、林業、木材関連産業への影響 — 現状及び問題点 —”，平成26年(2014) 9月1日。
- [11] 日本原子力学会，“モンテカルロ計算ハンドブック”，2006年9月。
- [12] 金子真司，坪山良夫，“森林の放射能調査と除染実証試験について 特集 東日本大震災による農林水産業の被害の実態と復興のシナリオ2”，農学会会報，17号，pp.73-86，2012年6月。
- [13] 金子真司，高橋正通，池田重人，赤間亮夫，“福島原発事故による森林生態系における放射性セシウム汚染とその動態”，日本土壤肥料科学雑誌，第85巻，第2号，pp.86-89，2014。
- [14] 林野庁プレスリリース，“森林内の放射性物質の分布状況及び分析結果について（中間とりまとめ）（別添1）森林内の放射性物質の分布状況の概要について”，平成23年9月30日。
- [15] 梶本卓也，et.al，“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，Vol.13，No.3(No.432)，pp.113-136，September 2014。
- [16] K.M.Miller, “Field Gamma-Ray Spectrometry”, EML Procedures Manual, HASL-300, Section 3.3, U.S. Department of Energy, February 1977.
- [17] 岩本洋介，佐藤大樹，遠藤章，坂本幸夫，呉田昌俊，久語輝彦，“汚染土壌の除染領域と線量低減効果の検討”，JAEA-Technology 2011-026，September 2011。
- [18] 梅田健太郎，小林悌二，“除染・遮蔽による空間線量低減効果のモンテカルロ法による解析”，東北工業大学紀要Ⅰ：理工学編，第33号，pp.9-18，2013年3月。
- [19] 木名瀬栄，“30年後の福島の環境放射線レベル推定とその技術開発”，日本原子力学会誌，Vol.58，No.6，pp.362-366，2016。
- [20] Richard B.Firestone, Virginia S. Shirley ed., “Table of Isotopes ,8th ed.”, John Wiley & Sons. Inc, 1996.
- [21] ICRP, ICRP PUBLICATION 107, “Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations”, ELSEVIER, 2008.
- [22] 文部科学省報道発表，“文部科学省による放射性物質の分布状況等に関する調査研究（森林内における放射性物質の移行調査）の結果について”，平成23年9月14日。
- [23] 林野庁プレスリリース，“森林の放射性物質の分布状況調査結果について，添付資料（別添）平成24年度森林内における放射性物質の分布状況調査結果について”，平成25年3月29日。
- [24] 高橋正通，“福島第一原発事故に伴うその後の森林木材への影響”，Isotope News 2014年8月号，No.724，pp.25-29。
- [25] 高橋正通，“森林の放射能汚染と除染にむけた課題”，放射線計測フォーラム福島，平成25年12月7日。

- [26] 外崎真理雄, 金子真司, 清野嘉之, “放射性セシウムによる森林や木材への影響について”, 日本木材学会 ウッディエンス・メールマガジン, 2012 年 3 月 27 日, No.023.
- [27] LA-UR-03-1987 “MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version5, Volume I: Overview and Theory”, Los Alamos, April 24, 2003.
- [28] 日本原子力学会, “放射線遮へい計算のための線量換算係数”, 2010.
- [29] 中村尚司, “放射線物理と加速器安全の工学 第 2 版”, 地人書館, 2001.