

森林域における除染効果確認のための上下方向別空間線量率測定

大谷義一・坪山良夫・岡野通明(森林総研), 橋内雅敏・新津 修(福島県林研セ)

要旨: 福島第一原子力発電所の事故に起因して拡散した放射性物質は、森林では林床、樹幹や樹冠などのさまざまな場所に分布する。そのため、地上付近で測定された放射線量率が森林内のどの部分に沈着した放射性物質由来であるかを判断することは、森林周辺における除染箇所の優先順位決定や除染効果を評価する上で、欠くことの出来ない技術となる。福島県郡山市の里山において、小型線量率計と鉛遮蔽台を用いた上下方向別(二流近似)の空間線量率測定を行った。その結果、除染前後での空間線量率変化に対する、樹種や土地利用の違いなどの影響が明らかとなった。

キーワード: ガンマ線, 空間線量率, 二流近似, 遮蔽, 除染

Abstract: Radioactive materials emitted accidentally from the Fukushima No.1 nuclear power plant have deposited inhomogeneously on various parts of forest, such as forest floor, tree stem and leaf canopy. Therefore, the estimating what adherent source of gamma ray is affecting the air dose rate is essential to find the priority and expected effect of the decontamination work. We have conducted the upward and downward (two-stream) dose rate measurements using a handy dosimeter with radiation shield in and around forests near the agricultural lands in Koriyama city, Fukushima prefecture. By the two-stream measurement, effects of the difference in forest type and land use on the dose rate before and after the decontamination have been clearly observed.

Keywords: gamma radiation, air dose rate, two-stream approximation, shielding, decontamination

I はじめに

福島第一原子力発電所の事故により、福島県を中心とする広い地域に放射性物質が拡散・沈着した。この地域の森林へ放射性物質が沈着した2011年3月中旬において、落葉広葉樹林は開葉前であったため放射性物質の多くが林床の落葉上に沈着したのに対し、常緑針葉樹林では放射性物質が樹冠にも沈着した。このような森林タイプの違いによって、森林内の放射性物質分布にも違いが生じている。このような森林周辺での除染においては、除染前に対象地域周辺で放射線量率測定を行い、除染後に再調査して線量率の低下から除染効果を確認するのが一般的である。この事前・事後の線量率測定において、地上付近で測定された線量率がどここの放射性物質由来であるかをある程度判断できれば、除染箇所の優先順位決定や除染効果を評価する上で有効だと考えられる。

特定の方向からのガンマ線とそれぞれの場所に分布する放射性物質の密度を関連づけて測定する技術としては、土壌表層での線量率測定に鉛による遮蔽体(鉛コリメータ)を使用するものがある(2)。本報では、森林内の放射性物質が樹冠から林床といった垂直方向に分布を持つ点に着目し、鉛遮蔽台を併用した小型線量率計による上下方向別の

線量率測定を試行した結果について報告する。

II 調査地と方法

1. 調査地及び試験区の概要 調査を行った森林は、福島県郡山市にある福島県林業研究センターの多田野試験林(37°23'N, 140°15'E)で、標高は360m~420mの丘陵地帯にある。山腹斜面下部にはスギが、中~尾根部にかけてはアカマツ林と広葉樹林が混在し、広葉樹林はコナラ、クリ、ヤマザクラ、ウワミズザクラ、エゴノキ、ミズキ、ヤマウルシ等で構成されている。試験地から東に約10km離れた林業研究センターでの年平均気温は12.0°C、年降水量は1089mmである(1)。航空機観測によるこの地域の空間線量率は0.5 μSv/h~1.0 μSv/h、¹³⁴Csおよび¹³⁷Csの合計沈着量は300kBq/m²~600kBq/m²とそれぞれ推定されている(3)。この試験地のスギ林(S39植栽)と広葉樹林(S27更新)内にそれぞれ試験区を設け、2011年9月から10月にかけて落葉層と下草の除去を行う除染試験を実施した(4)。試験区の大きさは20m×20m(斜面長)である。除染区中心と除染区周辺に図-1のように調査地点を配置した。

2. 小型線量率計と遮蔽台 線量率調査には小型線量率計(A2700, クリアパルス製)を使用した。線量率計は

Yoshikazu OHTANI, Yoshio TSUBOYAMA, Michiaki OKANO (Forestry & Forest Prod. Res. Inst. 1 Matsunosato, Tsukuba, Ibaraki, 305-8687 Japan); Masatoshi KITSUNAI, Osamu NIITSU (Fukushima Pref. For. Res. Ctr. 1 Nishi-Shimasaka, Narita, Asaka, Koriyama, Fukushima, 963-0112 Japan), Observation of upward and downward gamma radiation confirming the efficiency of decontamination in forested region.

81(W)×32(H)×141(D)mm の大きさで、CsI(Tl)シンチレータによってガンマ線を検出し、エネルギー補償を行う。測定レンジは0.001μSv/h～9.999μSv/hで、60sの移動平均値を10s毎に表示する。遮蔽台は厚さ約24mmの鉛製(UN-1207, ユニオンエース製)で、小型線量率計の形状に合わせて硯のような形状に加工されている(図-2)。小型線量率計に遮蔽台を取り付けると、遮蔽台方向からのガンマ線量が減少することで測器が指向性を持ち、これにより方向別の線量率測定が可能となる。

3. 線量率の測定 線量率の測定は1mの高さで行った。1回の測定について、まず遮蔽台を線量率計の下側に当てた状態で下向きの線量率 P を、つぎに遮蔽台ごと反転させ遮蔽台を上側にした状態で上向きの線量率 R を、最後に遮蔽台を用いない状態(通常測定法)で線量率 Q を測定した。測器の時定数に合わせて1分間隔で値を読み取り、3回の平均値を求めた。

4. 上下方向別測定値から二流線量率への変換 遮蔽台を取り付けた線量率計が受け取る放射線量は、遮蔽台形状やガンマ線のエネルギーなどの影響を受ける。そのため、下記のような簡単なパラメタリゼーションにより、前節で示した3種類の線量率測定値から鉛直上下方向の線量率(二流線量率と呼ぶ;二流はtwo-streamの訳)を求めた:

$$P = aP_0 + bR_0 \quad (1)$$

$$R = aR_0 + bP_0 \quad (2)$$

$$Q = P_0 + R_0 \quad (3)$$

ここに、 a は遮蔽台の開放方向からのガンマ線捕捉率、 b は遮蔽台の遮蔽方向からのガンマ線透過率、 P は下向き線量率測定値(μSv/h)、 R は上向き線量率測定値(μSv/h)、 Q は遮蔽しない状態の線量率測定値(μSv/h)を表す。 P_0 を二流下向き線量率(μSv/h)、 R_0 を二流上向き線量率(μSv/h)として、式(1)、式(2)を P_0 、 R_0 について整理すると、 a 、 b をパラメータとして上下方向別の線量率測定値から二流方向別線量率を求める式(4)、式(5)が得られる。

$$P_0 = \frac{aP - bR}{(a+b)(a-b)} \quad (4)$$

$$R_0 = \frac{aR - bP}{(a+b)(a-b)} \quad (5)$$

遮蔽付き線量率計の感度を表すパラメータ a 、 b は、以下のように実験的に決定した。すなわち、遮蔽台に取り付けた線量率計の周囲を、¹³⁷Cs 標準線源が線量率計のシンチレータ中心から等距離になるよう一周させ、角度10°毎に線量率を読み取った。このような測定を線量率計の長手方向およびそれと直交する2断面で実施して天頂角と感度の関係を求め(図-3)、これから天頂角ごとの半球にしめる面積を考慮して、開放側放射線捕捉率 a と遮蔽側放射線透過率 b

を決定した。

III 結果と考察

1. 遮蔽付き線量率計の特性 遮蔽付き線量率計の天頂角と感度の関係について、天頂角が0°の感度に対する相対値としてプロットすると図-4が得られた。図で天頂角の絶対値が90°以下の範囲は遮蔽台の開放側半球の感度変化を、天頂角の絶対値が90°を超える範囲は遮蔽側半球の感度変化をそれぞれ表す。

開放側半球では、絶対値が70°以下の広い範囲で0.9を超える感度を示し、それから天頂角絶対値が90°に近づくと急激に低下した。遮蔽側半球では、感度は0.1以下の範囲で推移し、天頂角の絶対値が120°付近で極小が見られた。極小値は、この角度でガンマ線が鉛遮蔽体の中を通る長さが最長となることに対応しており、ガンマ線の物理的な性質や遮蔽台の形状と矛盾しない。

また、a)、b)両グラフに見られる角度非対称性は、図-2のように線量率計を遮蔽台の片側に寄せて取り付けたことに起因しており、a)については線量率計で後方からの感度が小さいことも影響している。

天頂角ごとの半球に占める面積割合を考慮して係数 a 、 b を求めると $a=0.838$ 、 $b=0.065$ が得られ、以下の計算にはこの値を使用した。

2. 二流線量率の計算結果と評価 線量率を測定した各地点で P 、 R 、 Q を測定し、前節に示したパラメータ a 、 b を用いて、式(4)、式(5)から二流下向き線量率 P_0 と二流上向き線量率 R_0 を計算した。針葉樹林、広葉樹林と草地における結果を除染の有無で区分けし、図-5に示す。結果から、以下のような特徴が明らかとなった。

針葉樹林で除染区中央(O)と非除染区(V)を比較すると、O地点の R_0 は0.27μSv/hでV地点の0.43μSv/hより0.16μSv/h小さいのに対し、 P_0 の違いは0.03μSv/hにとどまっており、両地点における全線量率の違いは、主に林床の落葉層・下草除去の影響によると推察される。また、広葉樹林で除染区中央(J)と非除染区(M)を比較すると、J地点の R_0 は0.37μSv/hでM地点の0.63μSv/hより0.26μSv/h小さいのに対し、 P_0 の違いは0.01μSv/hとわずかで、両地点における全線量率の違いは、針葉樹林同様に主に林床の落葉層・下草除去の影響によると推察される。常緑樹林と落葉樹林の非除染区どうしの比較では、広葉樹林(M)の R_0 の値0.63μSv/hが針葉樹林(V)の値0.43μSv/hより0.20μSv/h大きいことから、広葉樹林の林床により多くの放射性物質が沈着していた可能性が示唆される。

3. いくつかの課題と今後の展開 前節で説明した二流上向き線量率 R_0 の地点間・処理間比較は、落葉層除去が

線量率に与える影響を矛盾無く説明していると思われる。しかし、同一地点での時系列的な比較になっていないため、放射性物質の沈着量がもともと地点毎に異なった影響を排除できていない。したがって、除染の前後に同一地点で上下各方向の二流線量率の測定を行えば、本報の試行結果よりも確実に放射性物質除去の実態を把握することが可能になると考える。

その一方で、本報に示した手法は現時点で未解決な問題があり、そのいくつかを指摘して今後の課題とする。まず、本報で用いた半球毎の放射線捕捉率パラメータ a, b の値は ^{137}Cs 線源に対して求めたものなので、 ^{134}Cs からの寄与がある場合など入射するガンマ線のエネルギースペクトルが変化すると変える必要がある。放射性物質が ^{134}Cs と ^{137}Cs に限られる場合、 ^{134}Cs の寄与が大きいほどガンマ線スペクトルのエネルギーが大きくなることが予想され、これは a, b を増加させる。 ^{134}Cs の半減期は約 2y と、 ^{137}Cs の約 30y に比べて短いため、現在刻々とその寄与が変化しつつある。本報の手法を定性的に用いるにせよ、パラメータが条件によってどの程度変化するか、さらに、それが結果にどの程度影響するかを知っておく必要がある。 (P_0+R_0) が Q の測定値に対してどれくらいの値になるかを調べ、 $(P_0+R_0)/Q$ を百分率で表すと、針葉樹林で 95%~98%、広葉樹林で 89%~94%、草地で 85%であり、より適切なパラメータ化によって改善の余地がある。

つぎに、常緑樹林と落葉樹林の非除染地どうしの比較において、 P_0 の違いは $0.01\mu\text{Sv/h} \sim 0.05\mu\text{Sv/h}$ と小さく、針葉樹林では樹冠にも多くの放射性物質が沈着したとする一般的な状況をうまく検出できていない可能性がある。調査地点による違いがあった、あるいは、測定高が 1m であるため樹冠という 10m~20m 上空からのガンマ線に対して感度が乏しい(ガンマ線の距離による減衰)などの原因が考えられる。これらは、真の放射性物質分布の把握と放射線量率形成のモデル化によって検証される必要がある。

IV おわりに

落葉層と下草の除去(除染)前後で線量率を比較すると、針葉樹林、広葉樹林とも下向きの線量率 P_0 に大きな変化は無いが、上向きの線量率 R_0 が大きく減少し、落葉層を除去した効果を顕著に検出することができた。また、落葉層の除去を実施していない森林の R_0 は、落葉樹林が針葉樹林より大きな値を示した。さらに、草地では落葉樹林を上回る R_0 が測定された。このように、上下方向別の線量率を測定することにより、空間線量率だけを測定するよりも放射性物質の分布に関してより多くの情報を得られることが分かり、放射性物質の沈着や除去に関して、樹種や落葉層除去の

有無、土地利用の違いなどの影響を定性的に説明するのに役立つと考えられた。今後は、遮蔽付き小型線量率計の特性解析や群落内のガンマ線分布推定のモデル化などを進め、森林内の放射性物質分布の違いが線量率の変動に及ぼす影響の解明に繋げたい。

遮蔽付き線量率計の特性試験にあたり、森林総合研究所の西口満博士から ^{137}Cs 標準線源の提供を受け、ガンマ線の性質に関する有益なアドバイスを頂いた。

本研究は、農林水産技術会議事務局プロジェクト「森林内の放射性物質に由来する影響を低減させる技術の開発」の一環として実施した。

V 引用文献

- (1) 福島県林業研究センター (2009) 多田野試験林第5次経営計画書
- (2) 溝口 勝 (2012) 冬の間凍土を剥ぎ取れ! , 農業農村工学会誌 **80**(2), 72
- (3) 文部科学省 (2011) 文部科学省による福島県西部の航空機モニタリングの測定結果について (http://radioactivity.mext.go.jp/ja/contents/5000/4894/24/1910_0912.pdf)
- (4) 林野庁 (2012) 12 落葉等除去による除染実証試験の概要「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)」, pp.18-20

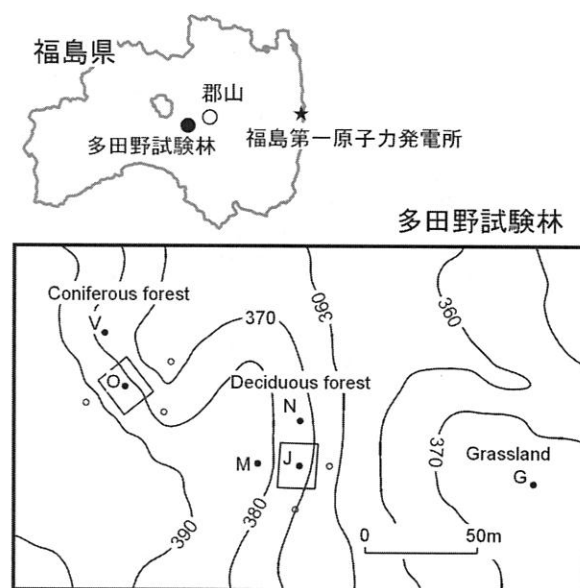


図-1. 調査地点の位置
□は落葉除去(除染)を行った区画、●は線量率の測定地点を表す。
Fig. 1 Study area. Rectangles show the area where litter was removed for the test of decontamination. Observed points of air dose rate in this study are indicated with black circle.

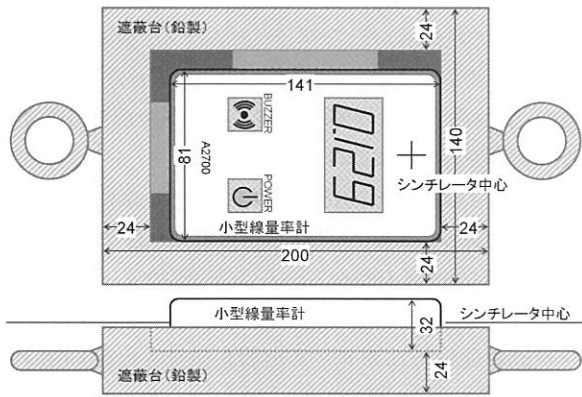


図-2. 小型線量率計と鉛製遮蔽台の取り付け状況
Fig. 2 Schematic view of a handy dose rate meter attached with lead radiation shield.

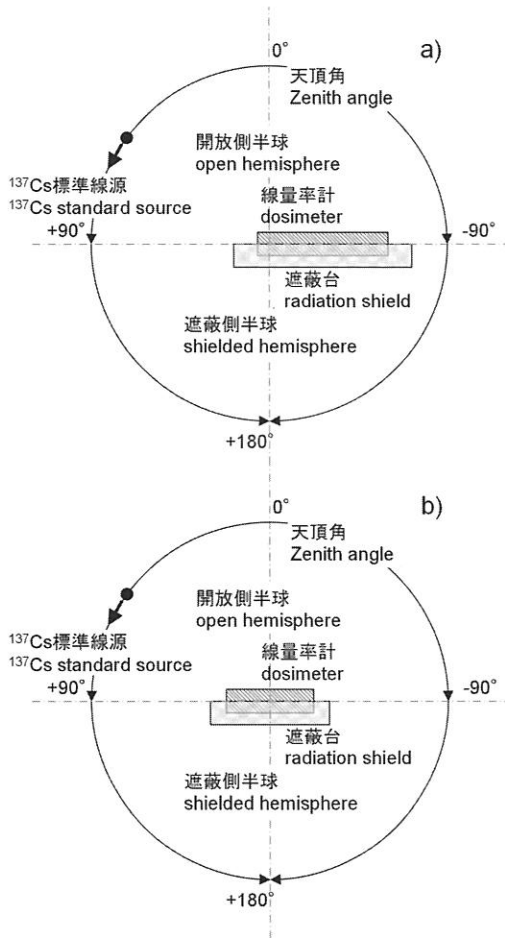


図-3. 遮蔽付き線量率計の角度別感度測定
Fig. 3 Sensitivity test of a handy dose rate meter attached with lead radiation shield along the vertical cross-section for a) longitudinal and b) transverse directions.

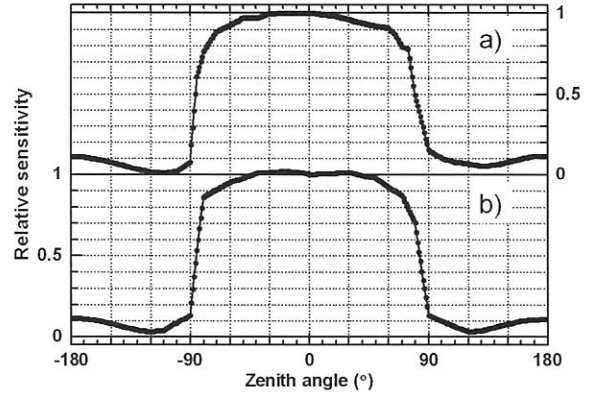


図-4. 遮蔽付き線量率計の垂直縦断面に沿った角度別感度特性
a)は線量率計の長手方向, b)は横断方向の感度をそれぞれ表す。
Fig. 4 Measured sensitivity of the handy dose rate meter with radiation shield along the vertical cross-section for a) longitudinal and b) transverse directions.

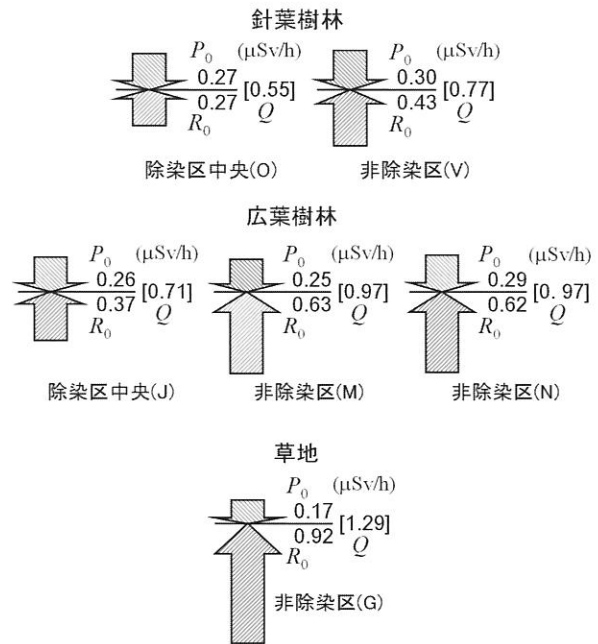


図-5. 多田野試験林における上向き R_0 , 下向き P_0 , 全方向 Q 線量率の測定結果
森林タイプや除染の有無別に表し, アルファベットは図-1に示した地点に対応する。
Fig. 5 Observed upward R_0 , downward P_0 and total Q air dose rate in Tadano experimental forest.
O: coniferous/decontamination;
V: coniferous/no-operation;
J: deciduous/decontamination;
M: deciduous/no-operation;
N: deciduous/no-operation;
G: grassland/no-operation.
Alphabetical letters correspond to the observed points indicated in Fig. 1.