資 料

地表の放射性核種から放出される直接線の平均光子移動距離の
理論解と線量率簡易計算への応用大森 敏明^{*1, #}, 加藤 信介^{*1}, 糠塚 重裕^{*2}

(2019 年 1 月 15 日受付)

(2019 年 3 月 14 日採択)

Theoretical Solutions for Mean Traveling Distance of Primary Photons Emitted from Radionuclide in Surface Soil and
Its Application to Estimate Radiation Dose RatesToshiaki OMORI,^{*1, #} Shinsuke KATO^{*1} and Shigehiro NUKATSUKA^{*2}

This paper presents theoretical solutions for mean traveling distance of primary photons emitted from ground contaminated with radionuclide. Three typical patterns of radioactivity distribution are considered: (1) plane superficial source, (2) homogeneous volume source and (3) exponentially decreasing activity as a function of soil depth. Radiation dose rate can be easily estimated using the fluence rate of primary photons and the buildup factor. We assume the buildup factor is possible to be evaluated using the mean traveling distance. Comparisons between the results calculated in the present work and those obtained using detail Monte Carlo simulation codes indicate a good agreement for various radioactivity distributions and for photon energy ranging from 0.5 to 2 MeV. This methodology is very useful to estimate environmental radiation dose rates in a short time and can be practically used by residents and local government agents to evaluate impacts of radioactivity as well as utilizing it for studies of reducing the influence of radioactivity.

KEY WORDS: analysis, calculation, cesium 137, cesium 134, dose rate, photon fluence rate, mean traveling distance, primary photon, radioactivity.

I 緒 論

無限に続く平坦な地面に放射性物質が様に沈着している状況は、放射能の環境影響を評価する上で最も単純で基本的なモデルであり、線量率の現場測定モデル計算などに用いられている¹⁻⁴⁾。

現場測定は通常地上 1 m で測定される。線源から放出された光子のうち、移動途中で散乱されて光子エネルギーが減少し、移動方向を変えた光子の寄与を含む。光

子が長い距離を移動する場合や大きな線減衰係数を持つ媒質中を移動する場合は、散乱される機会が増大するため、線量率への散乱線の寄与が大きくなる。放射性物質の地表への沈着状況は、原子力施設の事故等によって放射性物質が環境に放出された直後は、放射性物質は地表面に沈着するが、時間が経過するとともに徐々に土壤中に浸透していき、土壤の深さ方向の濃度分布は指数関数で近似できる場合が多い。事故後間もなく覆土した場合は覆土の厚みの下に沈着面が存在することになる。地面を掘り返した場合は、ある深さにわたって様な濃度の放射性物質の層が形成されるとみなせる。自然界に存在する放射性物質は深さ方向に一定濃度とみなせる場合が多い。

このような状況を勘案して、散乱の過程を組込んだモンテカルロ法による詳細計算により単色 γ 線や代表的な放射性核種について、地上 1 m における 1 cm 周辺線量当量や空気カーマが、地表への沈着状況ごとに計算され

^{*1} 東京大学生産技術研究所；東京都目黒区駒場 4-6-1, Cw-404 (〒153-8505)

Institute of Industrial Science, the University of Tokyo; Cw-404, 4-6-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8505, Japan.

^{*2} MHI ニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング (株)；(〒105-0004)

MHI Nuclear Systems and Solution Engineering Co., Ltd.; 6-16-12 Shimbashi, Minato-ku, Tokyo 105-0004, Japan.

Corresponding author; E-mail: omori001@iis.u-tokyo.ac.jp

変換係数として文献にまとめられている⁴⁻⁶⁾。形状が単純な地面において、放射能濃度や沈着状況が想定できる場合は、地上1 mに設置された放射線測定器に入射する γ 線スペクトルから上述の変換係数を用いて1 cm周辺線量当量率や空気カーマ率を求めることができる⁴⁾。

モンテカルロ法による詳細コード^{7, 8)}は、放射性物質の沈着状況や地域の地理的状况を考慮に入れて、より高精度の結果を得ることができる^{9, 10)}が、計算対象モデルの作成を含めた計算準備と計算の実行に多大の時間を必要とし、高度な専門性と高性能計算機を必要とする⁹⁾。そのため、点減衰核積分法に代表される簡易計算法も実用遮蔽設計に利用されている^{11, 12)}。

点減衰核法では、評価点で光子エネルギースペクトルを評価することはせず、線源から放出された光子が途中で衝突・散乱せずに評価点に到達した直接線に対して、ビルドアップ効果を上乘せして線量率を計算する方法が採用されている^{11, 12)}。線源が点ではなく、面や体積の場合は、線源を適切に面要素あるいは体積要素に分割して、個々の要素を点線源とみなして点減衰核法を適用して評価点での線量を計算した後、それらの総和を取ることで評価点における線量とするように拡張した点減衰核積分法が用いられる。点減衰核積分法では、個々の光子の移動経路に対応した線量ビルドアップ係数を評価する。

いま、面線源や体積線源から放出される全光子の評価点までの平均移動距離から求められる平均的な線量ビルドアップ係数を用いて線量を計算しても実用の観点から大きな誤差を生じないと仮定すれば、簡易計算を大幅に簡略化することができる。直接線（非散乱線）による光子フルエンス率は、放射性物質の地面へのそれぞれの沈着状況について理論解がすでに得られており^{1-4, 13)}、さらに、線源から放出される全光子の評価点までの平均移動距離の理論解が得られるからである。

本研究では、まず土壌の深さ方向に放射能分布を持つ平坦な地面について、光子の放出点から大気中の評価位置までの直接線の総移動距離を表す積分基礎式を導く。次いで、放射性核種が地表面にのみ沈着している場合、放射性核種が土壌中に浸透して放射能濃度が指数関数で表される場合と土壌の深さ方向に一樣の場合のそれぞれについて積分基礎式を解き理論解を導く。光子の直接線の平均移動距離およびフルエンス率は、いずれの沈着状況の場合も指数積分と指数関数で表され、表計算アプリにより容易に算出できるので、これらを用いて線量率の簡易計算をすることができる。

本研究による簡易計算法を、光子エネルギー0.1～2 MeVの範囲の単色 γ 線を放出する放射性核種が土壌中に指数関数的に分布している場合の1 cm周辺線量当量への変換係数について、詳細モンテカルロコードを用いた既往研究⁵⁾の計算結果と比較することにより、本簡易計算法の精度を確かめる。さらに原子力発電所等の事故の際に放出される主な放射性核種である¹³⁷Cs、¹³⁴Csおよび¹³¹Iが土壌中に指数関数的に分布している場合の1 cm周辺線量当量率を計算し、詳細モンテカルロコードを用いた既往研究^{5, 14)}の計算結果と比較する。また¹³⁷Csが表面に沈着した地表面を覆土した場合の空気カーマへの変換係数を計算して既往研究⁶⁾と比較することにより実用性を確かめる。

原子力施設の事故等により放射性物質が大気中に放出された直後は、放射能の環境影響を可及的速やかに把握することが必要である。本研究による手法は、表計算アプリで容易に線量率を計算することができるので、形状が平坦な地面に限られるが、事故直後の推定や、時間経過後に地域住民や自治体職員等が自ら計算して、放射能の影響と対策・効果を把握することを可能とする。

II 本研究で提案する線量率の簡易計算法の概要

Fig. 1に示すような放射線源と評価点の関係を考える。放射線源の体積領域を V 、その中の体積要素を dV とする。 dV の中心の位置ベクトルを $\mathbf{r}'$ 、評価点の位置ベクトルを $\mathbf{r}$ とする。放射線源に含まれるある放射性核種からエネルギー E の光子が単位体積当たり毎秒 S 個、等方的に放出されるとすると、評価点における γ 線の線量率 $D(\mathbf{r})$ は式(1)で表される^{11, 15)}。

Fig. 1 Source volume element of a radionuclide and evaluation point.

$$D(\mathbf{r}) = K \int_V \frac{S(\mathbf{r}') B(\mu|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) \exp(-\mu|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} dV \quad (1)$$

μ は線減衰係数, B は線量ビルドアップ係数, K は光子フルエンス (率) から線量 (率) への換算係数である。 μ は光子エネルギーおよび光子が通過する媒質の組成と密度により値が異なる。 K は光子エネルギーおよび評価しようとする線量の種類により値が異なる。点減衰核積分法では, 式 (1) により線量率を求める。

遮蔽体のない体系を考えると, 式 (1) で $B=1$ と置くことができ, 直接線の線量率 $D'(\mathbf{r})$ は式 (2) で表される。

$$D'(\mathbf{r}) = K \int_V \frac{S(\mathbf{r}') \exp(-\mu|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} dV = K\phi(\mathbf{r}) \quad (2)$$

ここで, $\phi(\mathbf{r})$ は直接線の光子フルエンス率であり式 (3) で表される。

$$\phi(\mathbf{r}) = \int_V \frac{S(\mathbf{r}') \exp(-\mu|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|)}{4\pi|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^2} dV \quad (3)$$

本研究では, 線量率を式 (4) で推定する簡易計算法を提案する。

$$D(\mathbf{r}) = BD'(\mathbf{r}) = BK\phi(\mathbf{r}) \quad (4)$$

点減衰核法では, 一組の点線源と評価点に対して光子の移動距離に基づいて線量ビルドアップ係数を評価して線量率を計算する。点減衰核積分法では, 体積線源を構成する各体積要素に点減衰核法を適用して線量率を計算した後, それらの総和をとることにより線量率を求める。これに対して本研究で提案する方法では, 体積線源から放出される全光子の評価点までの平均移動距離から平均的な線量ビルドアップ係数を求める。放射性物質の平坦な地表への主な沈着状況について, すでに理論解が得られている直接線の光子フルエンス率に加えて新たに平均移動距離が得られれば, 線量率の推定がきわめて容易になるという利点がある。III 章で直接線の平均移動距離の理論解を導出する。V 章で, 実際的なケースを対象として詳細計算法による既往の論文と本研究で提案する簡易計算法を比較することにより実用性を確かめる。

一方, 著者らは先に, 本研究で提案する方法を基にして三次元計算プログラムを開発して実際の建物モデルに適用し, 既往の研究結果と比較して実用上十分な精度で線量率を推定できることを報告した¹⁶⁾。しかし, 平均的な線量ビルドアップ係数を用いた場合の計算精度の基礎的な検討が十分にはなされていなかった。本論文にて,

理論構築が単純で明解な無限地表に放射性核種が沈着した体系を対象として, 平均的な線量ビルドアップ係数を用いた場合の精度を確かめる。

III 光子の平均移動距離の理論解

原子力施設の事故等により放射性物質が大気中に放出された直後は, 放射性物質は地表面に留まるが, 時間の経過とともに次第に土壤中に浸透していく。ここでは, 放射性物質の沈着状況に対応して, 地表面にのみ沈着している場合と土壤中に浸透した場合について, 空気中の評価位置における直接線の光子の平均移動距離の理論解を導く。土壤中に浸透した場合は, 放射能の土壤深さ方向の分布が指数関数で表される場合と一様の場合について取り扱う。直接線の光子フルエンス率の理論式は, 放射性核種が地表面にのみ沈着している場合^{1-3, 13)}, 土壤深さ方向の放射能分布が指数関数で表される場合¹⁻⁴⁾や一様の場合¹⁻³⁾について既知であるが, 読者が導出過程を追う際と線量率計算の便宜のために記載した。

Fig. 2 に示すように, 無限に続く平坦な地表面の鉛直上方の距離 h に評価位置をとり, 評価位置を原点 O とする。原点 O から鉛直下向きに z' 軸をとる。土壤中の体積要素 dV までの距離を r , z' 軸と r のなす角度を θ とする。

鉛直方向位置 z' におけるある放射性核種の単位体積当りの放射能 $f(z')$ は, 空気中で 0, 土壤中では $f(z)$ とする。

$$f(z') = \begin{cases} 0 & : z' < h \\ f(z) & : z' \geq h \end{cases} \quad (5)$$

ただし, z は地表面からの深さである。

$$z = z' - h \quad (6)$$

Fig. 2 Micro sphere at evaluation point above infinite half-space source geometry depicting source volume element in the soil.

光子の放出率を η 、空気と土壌の線減衰係数をそれぞれ μ_a 、 μ_s とすると、式 (3) より評価位置における直接線の光子フルエンス率 ϕ は式 (7) で表される。

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{\eta}{2} \int_0^{\pi/2} \tan\theta e^{-\mu_a h / \cos\theta} \int_0^\infty f(z) e^{-\mu_s z / \cos\theta} dz d\theta \\ &= \frac{\eta}{2} \int_1^\infty \frac{e^{-\mu_a h t}}{t} \int_0^\infty f(z) e^{-\mu_s z t} dz dt\end{aligned}\quad (7)$$

ここで、 $\sec\theta = t$ において変数を θ から t へ変換した。土壌中で放出された光子が評価位置の微小球の単位面積・単位時間あたりに到達する光子の総移動距離 l_{tot} は、 ϕ を確率密度関数とみなせば式 (8) のように求められる。

$$\begin{aligned}l_{tot} &= \frac{\eta}{2} \int_0^{\pi/2} \tan\theta e^{-\mu_a h / \cos\theta} \int_0^\infty r f(z) e^{-\mu_s z / \cos\theta} dz d\theta \\ &= \frac{\eta}{2} \int_0^{\pi/2} \frac{\tan\theta}{\cos\theta} e^{-\mu_a h / \cos\theta} \int_0^\infty (h+z) f(z) e^{-\mu_s z / \cos\theta} dz d\theta \\ &= \frac{\eta}{2} \int_1^\infty e^{-\mu_a h t} \int_0^\infty (h+z) f(z) e^{-\mu_s z t} dz dt\end{aligned}\quad (8)$$

平均移動距離 $\bar{l}$ は、微小球に到達した光子の総移動距離を微小球に到達した光子の総数で割ればよいので、式 (9) で表される。

$$\bar{l} = l_{tot} / \phi \quad (9)$$

1. 放射性物質が地表面にのみ沈着している場合の光子フルエンス率と平均移動距離

ある放射性核種が無限に広がる平坦な地面の表面にのみ沈着しているとする。単位表面積当たりの放射能を S_0 とすれば、式 (7) において z に関わる積分項を S_0 と置くことにより、光子フルエンス率 ϕ は式 (10) で求まる。

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{\eta S_0}{2} \int_0^{\pi/2} \tan\theta e^{-\mu_a h / \cos\theta} d\theta = \frac{\eta S_0}{2} \int_1^\infty \frac{e^{-\mu_a h t}}{t} dt \\ &= -\frac{\eta S_0}{2} Ei(-\mu_a h)\end{aligned}\quad (10)$$

$Ei(-\mu_a h)$ は指数積分 (exponential integral)¹⁷⁾ である。

微小球の単位面積・単位時間あたりに到達する光子の総移動距離 l_{tot} は、式 (11) のように求められる。

$$\begin{aligned}l_{tot} &= \frac{\eta S_0}{2} \int_0^{\pi/2} r \tan\theta e^{-\mu_a h / \cos\theta} d\theta = \frac{\eta S_0 h}{2} \int_1^\infty e^{-\mu_a h t} dt \\ &= \frac{\eta S_0}{2\mu_a} e^{-\mu_a h}\end{aligned}\quad (11)$$

無次元平均移動距離 $\bar{\tau}$ は、平均移動距離 $\bar{l}$ に線減衰係数を乗じて求められる。無次元平均移動距離は、光子の平均移動距離が平均自由行程の何倍かを示す無次元量であり、特に mfp (mean free path) を単位として用いることにする。

$$\bar{\tau} = \mu_a \bar{l} = \mu_a \frac{l_{tot}}{\phi} = -\frac{\exp(-\mu_a h)}{Ei(-\mu_a h)} \quad (12)$$

2. 放射性物質が土壌中に浸透している場合の光子フルエンス率と平均移動距離

土壌中の放射能濃度の深さ方向の分布は地域によって異なるが、地表面からの深さに対して指数関数で近似できる場合が多い。ここでは、指数関数的分布と一様分布の場合について直接線の光子の平均移動距離の理論解を導出する。

(1) 放射能濃度が指数関数で表される場合

放射能濃度が地表面からの深さ z に対して式 (13) に示す指数関数⁴⁾ で表されるとする。 S_0 は式 (14) に示すように、地表面から鉛直下向きにとった土壌柱に含まれる全放射能であり、地表面の単位面積当たりの値として表される。 L は $0.63 S_0$ となる深さ (緩衝深度) であり、放射性核種の土壌中への浸透の程度を表す。

$$f(z) = \frac{S_0}{L} e^{-z/L} \quad (13)$$

$$\int_0^\infty f(z) dz = S_0 \quad (14)$$

$$\int_0^L f(z) dz = 0.63 S_0 \quad (15)$$

式 (13) を式 (7) に代入すれば、評価位置における光子フルエンス率 ϕ は次のように表される。

$$\begin{aligned}\phi &= \frac{\eta S_0}{2L} \int_1^\infty \frac{e^{-\mu_a h t}}{t} \int_0^\infty e^{-(\mu_s t + 1/L)z} dz dt \\ &= \frac{\eta S_0}{2} \int_1^\infty \frac{1}{\mu_s L t + 1} \frac{e^{-\mu_a h t}}{t} dt \\ &= -\frac{\eta S_0}{2} \left\{ Ei(-\mu_a h) - e^{\frac{\mu_a h}{\mu_s L}} Ei\left(-\frac{\mu_a h}{\mu_s L}(\mu_s L + 1)\right) \right\}\end{aligned}\quad (16)$$

次に、式 (13) を式 (8) に代入すれば、微小球の単位面積・単位時間あたりに到達する光子の総移動距離 l_{tot} は次のように求められる。

$$\begin{aligned}l_{tot} &= \frac{\eta S_0}{2L} \int_1^\infty e^{-\mu_a h t} \int_0^\infty (h+z) e^{-(\mu_s t + 1/L)z} dz dt \\ &= \frac{\eta S_0}{2L} \left\{ \frac{h}{\mu_s} \int_1^\infty \frac{e^{-\mu_a h t}}{t + 1/\mu_s L} dt + \frac{1}{\mu_s^2} \int_1^\infty \frac{e^{-\mu_a h t}}{(t + 1/\mu_s L)^2} dt \right\} \\ &= -\frac{\eta S_0}{2L} \left\{ \frac{h}{\mu_s} e^{\frac{\mu_a h}{\mu_s L}} Ei\left(-\frac{\mu_a h}{\mu_s L}(\mu_s L + 1)\right) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\mu_s^2} \left\{ \mu_a h e^{\frac{\mu_a h}{\mu_s L}} Ei\left(-\frac{\mu_a h}{\mu_s L}(\mu_s L + 1)\right) + \frac{\mu_s L}{\mu_s L + 1} e^{-\mu_a h} \right\} \right\} \\ &= l_{tot_air} + l_{tot_soil}\end{aligned}\quad (17)$$

第1項は空気中における総移動距離, 第2項は土壌中における総移動距離を表す。無次元平均移動距離 $\bar{\tau}$ は式(18)で表される。

$$\bar{\tau} = \mu_a \frac{l_{tot_air}}{\phi} + \mu_s \frac{l_{tot_soil}}{\phi} \quad (18)$$

土壌の深さ方向の放射能濃度を式(19)で表すことができる⁴⁾。

$$A(\zeta) = A_0 e^{-\zeta/\beta} \quad (19)$$

ここで, $\zeta (= \rho z, \rho$: 土壌の密度, z : 土壌深さ)は土壌重量深度, A_0 は地表面における単位質量当たりの放射能濃度, β は重量緩衝深度で放射性核種の土壌中への移行の程度を表すパラメータである。土壌の密度 ρ が一定の場合, 式(16), (17)において, S_0/L を ρA_0 , L を β/ρ と置き換えれば, 放射能濃度分布を重量緩衝深度で表した場合の光子フルエンス率および光子の総移動距離の式を得ることができる。

(2) 放射能濃度分布が一様な場合

自然界に存在する放射性物質は深さ方向に一定濃度とみなせる場合が多い。単位体積当たりの放射能濃度を S_v として式(7)に代入すれば, 評価位置における光子フルエンス率 ϕ は次のように求められる。

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\eta S_v}{2} \int_1^\infty \frac{e^{-\mu_a h t}}{t} \int_0^\infty e^{-\mu_s z t} dz dt \\ &= \frac{\eta S_v}{2 \mu_s} \int_1^\infty \frac{e^{-\mu_a h t}}{t^2} dt \\ &= \frac{\eta S_v}{2 \mu_s} \left[\mu_a h Ei(-\mu_a h) + e^{-\mu_a h} \right] \end{aligned} \quad (20)$$

微小球の単位面積・単位時間当たりに到達する光子の総移動距離 l_{tot} は, 式(8)から次のように求められる。

$$\begin{aligned} l_{tot} &= \frac{\eta S_v}{2} \int_1^\infty e^{-\mu_a h t} \int_0^\infty (h+z) e^{-\mu_s z t} dz dt \\ &= \frac{\eta S_v}{2} \int_1^\infty \left(\frac{h}{\mu_s t} + \frac{1}{(\mu_s t)^2} \right) e^{-\mu_a h t} dt \\ &= -\frac{\eta S_v}{2} \left[\frac{h}{\mu_s} Ei(-\mu_a h) - \frac{1}{\mu_s^2} \left(\mu_a h Ei(-\mu_a h) + e^{-\mu_a h} \right) \right] \\ &= l_{tot_air} + l_{tot_soil} \end{aligned} \quad (21)$$

無次元平均移動距離は, ϕ および l_{tot_air} と l_{tot_soil} の値を式(18)に代入して求める。

IV 無次元平均移動距離を用いた線量率の簡易計算法

本研究で提案する簡易計算では, 式(4)に示すよう

に直接線の光子フルエンス率 ϕ に線量換算係数 K を乗じて直接線の線量率 D' を, 直接線の線量率に平均的な線量ビルドアップ係数 B を乗じて直接線と散乱線両方の寄与を合算した線量率 D を計算する。線量換算係数は, 日本原子力学会標準「放射線遮へい計算のための線量換算係数」¹⁸⁾により, 線量ビルドアップ係数は「 γ 線ビルドアップ係数」¹⁹⁾に基づいて, 無次元移動距離(mfp単位)に対するGP近似式によって求めることができる。線量換算係数および線量ビルドアップ係数は, 評価しようとする線量率が空気カーマ率, 実効線量率, あるいは周辺線量当量率かによって異なるので適切に選択しなければならない。線量ビルドアップ係数は物質により値が異なるが, 現状では単一層の物質で代用する必要がある¹²⁾。本研究では, 空気に対する線量ビルドアップ係数を用いた。

放射性核種から放出される光子エネルギーが複数ある場合は, それぞれの光子エネルギーについて線量率を計算し, すべての光子エネルギーによる寄与を加算する。放射線源に複数の放射性核種が含まれる場合は, すべての放射性核種の寄与を加算する。

V 詳細計算に基づく既往の研究との比較による簡易計算法の実用性の検証

1. 土壌中の放射能濃度分布が指数関数で表される場合

土壌中に浸透した放射性物質の放射能濃度の分布は, 地表面からの深さに対して指数関数で近似できる場合が多い。このような指数関数的な放射能分布になる実際のケースについて既往の研究と比較することにより本研究で提案する簡易計算法を実用に供する場合の妥当性を調べる。

(1) 斎藤らの研究との比較

一般に, 放射性物質からは複数の異なる光子エネルギーの光子が放出されるので, 原子力発電所の事故等により放出される可能性が高い放射性物質への適用を考えて, 光子エネルギーが0.1~2 MeVの範囲について調べることにする。

斎藤らは, 光子エネルギーが0.01~5 MeVの範囲の単色 γ 線が重量緩衝深度0~1,000 kg m⁻²で分布する場合について, モンテカルロ法による詳細コードYURI²⁰⁾を用いて, 地表単位面積(m²)当たり1個光子が放出されるときに地上1 mにおける1 cm周辺線量当量(以下, 周辺線量当量という)を表す変換係数(μ Sv per photon/m²)を計算している⁵⁾。斎藤らの計算結果と比較することにより, 本研究による簡易計算法を実用計算に適用す

Table 1 Component of soil and air employed for the photon transport calculation in the environment.

Soil		Air	
Molecule	Weight ratio (-)	Element	Weight ratio (-)
SiO ₂	0.56	N	0.755
Al ₂ O ₃	0.16	O	0.232
Fe ₂ O ₃	0.08	Ar	0.013
H ₂ O	0.2		
Density	1,000 kg m ⁻³	Density	1.2 kg m ⁻³

る場合の妥当性を調べる。土壌および空気組成と密度は **Table 1** に示す原論文に示された値を用いた。土壌の線減衰係数は、放射物性計算コード²¹⁾により土壌の組成と密度から計算して 7.68 m^{-1} を得た。空気の線減衰係数は 0.00925 m^{-1} とした。

Fig. 3 に、周辺線量当量変換係数の本研究による計算結果（実線）と斎藤らの計算結果（破線）を示す。**Fig. 4** に、斎藤らの計算結果を真値とみなした時の誤差率を示す。光子エネルギーが $0.5 \sim 2 \text{ MeV}$ の範囲では、5% 以下の誤差で線量を推定可能であることがわかる。重量緩衝深度 0 kg m^{-2} （放射性核種が地表面にのみ沈着）では、光子エネルギーが 0.1 MeV で誤差率 13%, 0.2 および 0.3 MeV で 8% であり、光子エネルギーが小さい場合に誤差が増加する傾向がある。重量緩衝深度 50 kg m^{-2} 以上では、 $0.1 \sim 2 \text{ MeV}$ の範囲で誤差率 5% 以下である。なお光子エネルギーが 3 MeV では、誤差率が 25 ~ 50% であった。したがって、本研究による簡易計算を光子エネルギーが 2 MeV を越える γ 線への適用は避けるべきである。

次に、原子力発電所事故後に検出されることが多い ^{134}Cs , ^{137}Cs および ^{131}I の土壌中への沈着について斎藤らの結果⁵⁾と比較する。各放射性核種の光子エネルギーと放出率は **Table 2** に示す値を用い、放射能面密度を 1 kBq m^{-2} とした場合の地上 1 m における周辺線量当量率を計算する。**Fig. 5, 6** に示すように、本研究による計算結果は斎藤らの詳細計算結果と比べて重量緩衝深度 $0 \sim 100 \text{ kg m}^{-2}$ の範囲で、放射性核種が ^{137}Cs の場合で 1.5 ~ 4%, ^{134}Cs で 3 ~ 5%, ^{131}I で 5 ~ 8% 小さい。 ^{134}Cs では一部が、 ^{131}I では大部分が光子エネルギー 0.5 MeV 以下で放出されるため、 ^{137}Cs に比べて誤差がやや大きい。

(2) 平山らの研究との比較

平山らは、地表に広く分布した放射性物質による地上 1 m における γ 線スペクトル分布の測定と電磁カスケードモンテカルロコード EGS5²²⁾を用いた計算を行った¹⁴⁾。土壌は **Table 3** に示す組成を有し、密度は測定に

Fig. 3 Conversion coefficients from unit areal photon emission density to ambient dose equivalent for exponentially distributed sources in soil emitting mono-energetic gamma rays. **Fig. 4** Showing differences of conversion coefficients between this study and SAITO et al.⁵⁾ as error.

基づき 900 kg m^{-3} としている。土壌の線減衰係数は、放射物性計算コード²¹⁾により土壌の組成と密度から計算して 7.08 m^{-1} を得た。空気の密度は 1.205 kg m^{-3} 、線減衰係数は 0.00929 m^{-1} とした。無限に広がる平坦な地面に ^{137}Cs が 10 kBq m^{-2} で一様に沈着しているとし、 ^{137}Cs が地表面にのみ沈着している場合、重量緩衝深度が 5 kg m^{-2} , 10 kg m^{-2} および 30 kg m^{-2} で土壌中に浸透している場合の線量率の計算を行い平山らの結果と比較した。**Table 4** に直接線による光子フルエンス率と無次元

Table 2 Photon energy and yield of decay for ^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{131}I .

^{137}Cs		^{134}Cs		^{131}I	
E (MeV)	η (%)	E (MeV)	η (%)	E (MeV)	η (%)
0.662	85.1	0.243	0.03	0.08	2.62
		0.327	0.02	0.284	6.14
		0.475	1.49	0.365	81.7
		0.563	8.35	0.637	7.17
		0.569	15.38	0.723	2.0
		0.605	97.62		
		0.796	85.53		
		0.802	8.69		
		1.039	0.99		
		1.168	1.79		
		1.365	3.01		

平均移動距離の計算結果を示す。直接線による光子フルエンス率は、当然のことながら両者はよく一致している。空気中における光子の平均移動距離は、重量緩衝深度が小さい場合に大きく、緩衝深度が大きくなるに従い減少する。土壌中の光子の平均移動距離は、重量緩衝深度が大きくなるに従い増加する。空気中および土壌中の無次元平均移動距離の和は、重量緩衝深度が大きくなるほど増加する。無次元平均移動距離で評価した線量ビルドアップ係数は重量緩衝深度が大きくなるほど増加する。**Table 5**に周辺線量当量率、AP照射実効線量率およびISO照射実効線量率の計算結果を、線量ビルドアップ係数、直接線の線量率とともに示す。 K は線量換算係数である。直接線の光子フルエンス率は、**Table 4**に示したとおり平山らの結果とよく一致しており、したがって直接線の線量率も良く合っている。直接線と散乱線の両方の寄与を加算した線量率に関しては、本研究では式(4)で示したように直接線の線量率に無次元平均移動距離から求めた線量ビルドアップ係数を乗じて求めた。本研究による計算結果は平山らの計算結果と比べると3~4%小さい。

2. 地表面に沈着した放射性物質を覆土した場合

斎藤らは、地表面に一樣に沈着した単色エネルギーの線源を覆土した場合の地上高さ方向の空気カーマの変化をモンテカルロ法によって詳細計算している⁶⁾。光子エネルギーは0.01~5 MeVの範囲、覆土厚さは0~2,000 kg m^{-2} (土壌重量深度)の範囲で地表単位面積 (m^2) 当たり1個光子が放出されるときの評価点高さにおける空気カーマを表す変換係数 ($\mu\text{Gy per photon/m}^2$) を計算している。ここでは、0.662 MeV (^{137}Cs から放出される光子エネルギー) の線源について、覆土厚さ0~

Fig. 5 Ambient dose equivalent rates as a function of relaxation mass per unit area for exponentially distributed radionuclides (^{137}Cs , ^{134}Cs and ^{131}I) in soil. **Fig. 6** Showing differences of ambient dose equivalent rates between this study and SAITO et al.⁵⁾ as error.**Table 3** Component of soil for the photon transport calculation in the environment.

Element	Weight ratio (—)
H	0.021
C	0.016
O	0.577
Al	0.050
Si	0.271
K	0.013
Ca	0.041
Fe	0.011

Table 4 Photon fluence rates and non-dimensional mean traveling distances for primary photons at 1 m above the ground with ^{137}Cs (10 kBq m^{-2}) exponentially distributed in soil.

Relaxation mass per unit area	(kg m^{-2})	0	5	10	30
Photon fluence rate	($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	17493	11789	9800	6456
Photon fluence rate, HIRAYAMA et al. ¹⁴⁾	($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	17500	11800	9800	6460
Mean traveling distance in air	(m)	25.95	12.31	9.98	7.25
Mean traveling distance in soil	(m)	0.000	0.032	0.043	0.065
Non-dimensional mean traveling distance in air	(mfp)	0.241	0.114	0.093	0.067
Non-dimensional mean traveling distance in soil	(mfp)	0.000	0.230	0.306	0.461
Non-dimensional mean traveling distance	(mfp)	0.241	0.344	0.399	0.528
Buildup factor evaluated by non-dimensional distance	(-)	1.277	1.417	1.494	1.689

Table 5 Radiation dose rates at 1 m above the ground with ^{137}Cs (10 kBq m^{-2}) exponentially distributed in soil, showing differences between this study and HIRAYAMA et al.¹⁴⁾ as error.

	Relaxation mass per unit area	(kg m^{-2})	0	5	10	30
Ambient dose equivalent rate ($K = 3.745 \times 10^{-10} \text{ } \mu\text{Sv m}^2$)	Buildup factor	(-)	1.277	1.417	1.494	1.689
	for primary photons	($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.0236	0.0159	0.0133	0.0087
	for primary and scattered	($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.0301	0.0225	0.0197	0.0147
	HIRAYAMA et al.	($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.0312	0.0233	0.0204	0.0152
	Error	(%)	-3.4	-3.4	-3.2	-3.3
Anterior-Posterior effective dose rate ($K = 3.176 \times 10^{-10} \text{ } \mu\text{Sv m}^2$)	Buildup factor	(-)	1.27	1.404	1.478	1.666
	for primary photons	($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.02	0.0135	0.0112	0.0074
	for primary and scattered	($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.0254	0.0189	0.0166	0.0123
	HIRAYAMA et al.	($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.0263	0.0197	0.0172	0.0128
	Error	(%)	-3.4	-3.9	-3.6	-3.8
Isotropic effective dose rate ($K = 2.149 \times 10^{-10} \text{ } \mu\text{Sv m}^2$)	Buildup factor	(-)	1.242	1.361	1.426	1.59
	for primary photons	($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.0135	0.0091	0.0076	0.005
	for primary and scattered	($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.0168	0.0124	0.0108	0.0079
	HIRAYAMA et al.	($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	0.0173	0.0128	0.0112	0.0082
	Error	(%)	-2.9	-3	-3.4	-3.4

K: Dose rate conversion factor. Buildup factors were evaluated by non-dimensional mean traveling distance.

500 kg m^{-2} の範囲で本研究による簡易計算を行った。評価点の地上からの高さは $1 \sim 100 \text{ m}$ とした。土壌および空気の組成と密度は **Table 1** に示す原論文に示された値を用いた。土壌の線減衰係数は、放射物性計算コード²¹⁾により土壌の組成と密度から計算して 7.68 m^{-1} を得た。空気の線減衰係数は 0.00925 m^{-1} とした。

計算結果を斎藤らによる結果とともに **Table 6** に示す。斎藤らの結果を真値とみなして誤差率とした。覆土厚さが 100 kg m^{-2} 以下であれば、簡易計算結果は詳細計算結果のおおむね 5% 以内の誤差、覆土厚さ 200 kg m^{-2} 以下であればおおむね 10% 以内の誤差である。

なお、地表面を厚さ h_s の土で覆った場合の地上 h における光子フルエンス率および無次元平均移動距離の理論解は式 (10) および (12) を適用すれば、式 (22), (23) でそれぞれ示される。

$$\phi = -\frac{\eta S_0}{2} \text{Ei}(-\sum_k \mu_k h_k) = -\frac{1}{2} \text{Ei}(-(7.68h_s + 0.00925h)) \quad (22)$$

$$\bar{\tau} = -\frac{\exp(-\sum_k \mu_k h_k)}{\text{Ei}(-\sum_k \mu_k h_k)} = -\frac{\exp(-(7.68h_s + 0.00925h))}{\text{Ei}(-(7.68h_s + 0.00925h))} \quad (23)$$

VI 考 察

現場測定結果や詳細計算結果の報告例は、平坦な地表に沈着した放射性核種による地上 1 m における周辺線量当量率に関するものが多い。東京電力福島第一発電所事故で放出された主な放射性核種は、 ^{131}I 、 ^{134}Cs および ^{137}Cs である²³⁾。**Table 2** に示すように、 ^{131}I の主要スペクトルは $0.284 \sim 0.723 \text{ MeV}$ 、 ^{134}Cs は $0.475 \sim 1.365 \text{ MeV}$ 、 ^{137}Cs は 0.662 MeV である。これより、原子力発電所事故等で放出される放射性核種の多くは、主要スペクトルが $0.1 \sim 2 \text{ MeV}$ の範囲にあるとみなすことができる。放射性核種の地表への沈着状況は、事故直後は地表面に沈着するが時間経過とともに土壌中に浸透していき深さ方向の放射能濃度が指数関数で近似できる場合が多い。放射性核種の土壌中への浸透は、たかだか重量緩衝深度

Table 6 Air kerma per unit source intensity of 0.662 MeV for plane source geometry (μGy per photon / m^2), showing differences between this study and SAITO et al.⁶⁾ as error.

Source depth kg m^{-2}	Evaluation height (m)														
	1			5			10			50			100		
	This study	SAITO et al.	Error	This study	SAITO et al.	Error	This study	SAITO et al.	Error	This study	SAITO et al.	Error	This study	SAITO et al.	Error
0	7.94E-10	8.19E-10	-3.1	5.54E-10	5.73E-10	-3.3	4.53E-10	4.67E-10	-3.1	2.24E-10	2.29E-10	-2.3	1.31E-10	1.35E-10	-2.7
1	7.03E-10	7.27E-10	-3.3	5.32E-10	5.51E-10	-3.5	4.41E-10	4.57E-10	-3.5	2.22E-10	2.28E-10	-2.8	1.30E-10	1.34E-10	-2.8
3	6.07E-10	6.27E-10	-3.2	4.95E-10	5.10E-10	-3.0	4.21E-10	4.34E-10	-3.1	2.17E-10	2.23E-10	-2.6	1.28E-10	1.31E-10	-2.1
5	5.50E-10	5.67E-10	-3.0	4.66E-10	4.79E-10	-2.8	4.03E-10	4.15E-10	-3.0	2.13E-10	2.18E-10	-2.4	1.26E-10	1.29E-10	-2.2
7	5.09E-10	5.23E-10	-2.7	4.41E-10	4.53E-10	-2.6	3.87E-10	3.98E-10	-2.9	2.09E-10	2.14E-10	-2.5	1.24E-10	1.27E-10	-2.2
10	4.63E-10	4.76E-10	-2.7	4.11E-10	4.22E-10	-2.5	3.66E-10	3.75E-10	-2.5	2.03E-10	2.08E-10	-2.5	1.21E-10	1.24E-10	-2.1
20	3.71E-10	3.76E-10	-1.3	3.42E-10	3.48E-10	-1.8	3.12E-10	3.17E-10	-1.5	1.85E-10	1.88E-10	-1.8	1.12E-10	1.14E-10	-1.5
30	3.16E-10	3.18E-10	-0.6	2.96E-10	2.98E-10	-0.8	2.74E-10	2.76E-10	-0.7	1.69E-10	1.71E-10	-1.2	1.04E-10	1.06E-10	-1.9
50	2.46E-10	2.43E-10	1.4	2.34E-10	2.32E-10	0.8	2.20E-10	2.18E-10	0.8	1.43E-10	1.43E-10	-0.2	8.95E-11	9.02E-11	-0.7
70	2.01E-10	1.95E-10	3.0	1.92E-10	1.87E-10	2.7	1.82E-10	1.78E-10	2.1	1.22E-10	1.21E-10	0.5	7.73E-11	7.77E-11	-0.5
100	1.54E-10	1.46E-10	5.3	1.48E-10	1.41E-10	4.8	1.41E-10	1.35E-10	4.1	9.66E-11	9.45E-11	2.3	6.23E-11	6.17E-11	1.0
150	1.03E-10	9.57E-11	8.1	9.97E-11	9.24E-11	7.9	9.53E-11	8.86E-11	7.6	6.70E-11	6.45E-11	3.9	4.38E-11	4.26E-11	2.7
200	7.15E-11	6.41E-11	11.6	6.91E-11	6.26E-11	10.3	6.62E-11	6.03E-11	9.7	4.70E-11	4.44E-11	5.9	3.09E-11	2.98E-11	3.7
300	3.53E-11	3.01E-11	17.3	3.41E-11	2.96E-11	15.4	3.28E-11	2.84E-11	15.3	2.35E-11	2.12E-11	10.6	1.55E-11	1.44E-11	7.6
500	8.90E-12	6.94E-12	28.2	8.61E-12	6.80E-12	26.6	8.26E-12	6.54E-12	26.3	5.92E-12	5.07E-12	16.7	3.91E-12	3.43E-12	13.9

Error (%)

60 kg m^{-2} 程度²⁾と想定されるので、地表面にのみに沈着している場合の重量緩衝深度 0 から、1,000 kg m^{-2} までの範囲で検討すれば十分と考えられる。なお、重量緩衝深度 $\beta \rightarrow 0$ の場合は放射性物質が地表面にのみ沈着している場合、 $\beta \rightarrow \infty$ の場合は土壌深さ方向に一樣の場合に相当する。

上記を踏まえて、無限に続く平坦な地表に放射性物質が沈着し、土壌への沈着状況が指数関数で表される場合について、単色 γ 線あるいは原子力発電所事故等で放出される主な放射性核種から放出される γ 線による地上 1 m における周辺線量当量率を計算した。本研究による簡易計算結果とモンテカルロ法による詳細計算結果との差が 5% 以内で収まるのは、重量緩衝深度 0 ~ 1,000 kg m^{-2} の範囲で光子エネルギー 0.5 ~ 2 MeV、あるいは重量緩衝深度 50 ~ 1,000 kg m^{-2} で光子エネルギー 0.1 ~ 2 MeV の範囲であった。

汚染土壌を清浄な土で覆土する効果の推定に利用することも可能である。¹³⁷Cs が表面に沈着した地表面を覆土した場合の地上 1 ~ 100 m の範囲の空気カーマへの変換係数の本研究による計算結果は、斎藤らの詳細計算結果と比べて、覆土厚さ 100 kg m^{-2} 以下でおおむね 5% 以内、200 kg m^{-2} 以下でおおむね 10% 以内であった。汚染土壌を覆土して線量率の低減を図る場合は、覆土による線量率の低下を覆土前の線量率と比較することにより線量低減効果を表すのが適当と考えられるので、覆土厚さと空気カーマ率低減割合の関係を **Table 7** に示した。簡易計算結果は詳細計算結果とよく一致している。

土壌中の放射能分布が指数関数で表される場合の光子エネルギー 0.1 ~ 2 MeV の範囲の単色 γ 線による地

上 1 m における線量の計算結果、および地表面に沈着した 0.662 MeV の線源 (¹³⁷Cs) を覆土した場合の地上 1 ~ 100 m における線量の計算結果を踏まえれば、本研究による簡易計算方法を平坦な地表における線量率の推定に利用することができるといえよう。

本研究で比較対象とした斎藤ら、および平山らが用いた土壌の組成と密度は異なっている。土壌組成は質量減衰係数 (μ_a/ρ) の値に影響する。土壌組成として、平山らは米国の EPA-302-R-93-081 のデータを採用したとしており、質量減衰係数は 0.662 MeV で $7.86 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ である。斎藤らが用いた土壌組成に基づく質量減衰係数は $7.68 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$ であり、両者はわずかに (2.3%) 異なる。密度については、平山らは実測に基づき 900 kg m^{-3} 、斎藤らは 1,000 kg m^{-3} としている。これらより線減衰係数を求めると、平山らは 7.08 m^{-1} 、斎藤らは 7.68 m^{-1} となり、両者の差異は 6% である。重量緩衝深度が 30 kg m^{-2} の時の周辺線量当量率は、平山らの結果 $0.0152 \mu\text{Sv h}^{-1}$ に対して斎藤らの結果は $0.0151 \mu\text{Sv h}^{-1}$ でありほぼ等しい。

一般に土壌組成は場所により、深さにより変化すると考えられ、これを忠実に計算に反映させるためには詳細計算を行う必要がある。放射性核種の土壌中への浸透はただか重量緩衝深度 60 kg m^{-2} 程度と想定され、地表面に近いほど濃度が高い指数関数的な分布に近似できる場合が多い。簡易計算では放射性核種が高濃度で存在する深さにおける土壌組成を代表値として採用するか、高濃度範囲の平均値をとればよいと考えられる。

Table 7 Air kerma reduction rate (%) owing to covering clean earth, for plane source with 0.662 MeV, compared to SAITO et al.⁶⁾

Source depth kg m ⁻²	Evaluation height (m)									
	1		5		10		50		100	
	This study	SAITO et al.	This study	SAITO et al.	This study	SAITO et al.	This study	SAITO et al.	This study	SAITO et al.
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	11.4	11.2	4.1	3.8	2.6	2.1	1.0	0.4	0.8	0.7
3	23.5	23.4	10.7	11.0	7.1	7.1	3.0	2.6	2.4	3.0
5	30.8	30.8	16.0	16.4	11.1	11.1	4.9	4.8	3.9	4.4
7	35.9	36.1	20.3	20.9	14.6	14.8	6.8	6.6	5.4	5.9
10	41.6	41.9	25.7	26.4	19.3	19.7	9.4	9.2	7.6	8.1
20	53.3	54.1	38.3	39.3	31.0	32.1	17.5	17.9	14.5	15.6
30	60.2	61.2	46.6	48.0	39.5	40.9	24.5	25.3	20.8	21.5
50	69.0	70.3	57.8	59.5	51.5	53.3	36.3	37.6	31.8	33.2
70	74.7	76.2	65.4	67.4	59.9	61.9	45.7	47.2	41.1	42.4
100	80.6	82.2	73.3	75.4	69.0	71.1	56.8	58.7	52.6	54.3
150	87.0	88.3	82.0	83.9	78.9	81.0	70.1	71.8	66.7	68.4
200	91.0	92.2	87.5	89.1	85.4	87.1	79.0	80.6	76.5	77.9
300	95.6	96.3	93.8	94.8	92.8	93.9	89.5	90.7	88.2	89.3
500	98.9	99.2	98.4	98.8	98.2	98.6	97.4	97.8	97.0	97.5

VII 結 論

- (1) 放射性核種が地表面にのみ沈着している場合、土壤中に浸透して土壤中の放射能濃度が指数関数で表される場合と一様分布の場合の三通りについて、直接線に対する光子の平均移動距離の理論解を求めた。
- (2) 直接線の無次元平均移動距離の関数として平均的な線量ビルドアップ係数を求める方法を提案した。
- (3) 光子エネルギー 0.5 ～ 2 MeV、重量緩衝深度 0 ～ 1,000 kg m⁻² の範囲に対する周辺線量当量への変換係数の本研究による計算値と斎藤らの詳細計算結果との差異は 5% 以下であった。
- (4) 本研究による周辺線量当量率の計算結果は、斎藤らの詳細計算結果と比べて重量緩衝深度 0 ～ 100 kg m⁻² の範囲で、放射性核種が ¹³⁷Cs の場合で 1.5 ～ 4%, ¹³⁴Cs で 3 ～ 5%, ¹³¹I で 5 ～ 8% 小さかった。
- (5) 本研究による ¹³⁷Cs に対する周辺線量当量率、AP 実効線量率および ISO 実効線量率の計算結果は、平山らの詳細計算結果と比べて重量緩衝深度 0 ～ 30 kg m⁻² の範囲で、3 ～ 4% 小さかった。
- (6) ¹³⁷Cs が表面に沈着した地表面を覆土した場合の地上 1 ～ 100 m の範囲の空気カーマ率への変換係数の本研究による計算結果は、斎藤らの詳細計算結果と比べて、覆土厚さ 100 kg m⁻² 以下でおおむね 5% 以内、200 kg m⁻² 以下でおおむね 10% 以内であった。空気カーマ率低減割合で評価するとよく一致した。

以上より、平坦な地面に沈着した放射性核種から放出される主要スペクトルが 0.5 ～ 2 MeV の γ 線による線量

率を、直接線の光子フルエンス率と無次元平均移動距離の理論式を用いて実用上十分な精度で簡易に推定できることが示された。

記 号 説 明

- A : 面積 [m²]
 A_0 : 地表面における単位質量当たりの放射能濃度 [Bq kg⁻¹]
 B : 線量ビルドアップ係数 [-]
 D : 直接線と散乱線の両方による空気カーマ率 [μ Gy h⁻¹], または線量率 [μ Sv h⁻¹]
 D' : 直接線による空気カーマ率 [μ Gy h⁻¹], または線量率 [μ Sv h⁻¹]
 E : 光子エネルギー [MeV]
 $Ei(-\mu h)$: 指数積分 [-]
 $f(z)$: 地表面からの深さ z における単位体積当たりの放射能 [Bq m⁻³]
 h : 評価位置の地表面からの高さ [m]
 K : 線量換算係数 [$(\mu$ Gy h⁻¹)/(m⁻² s⁻¹)], [$(\mu$ Sv h⁻¹)/(m⁻² s⁻¹)]
 L : 緩衝深度 [m]
 l_{tot} : 光子の総移動距離 [m (m⁻² s⁻¹)]
 $l_{tot, air}$: 空気中における光子の総移動距離 [m (m⁻² s⁻¹)]
 $l_{tot, soil}$: 土壌中における光子の総移動距離 [m (m⁻² s⁻¹)]
 $\bar{l}$: 光子の平均移動距離 [m]
 r : 評価位置から土壌体積要素までの距離 [m]
 S : 単位時間、単位体積当たり放出される光子数 [m⁻³ s⁻¹]
 S_0 : 単位面積当たりの放射能 [Bq m⁻²]
 S_v : 単位体積当たりの放射能 [Bq m⁻³]

z : 地表面からの土壌の深さ [m]
 z' : 鉛直下向き座標 [m]
 β : 重量緩衝深度 [kg m^{-2}]
 ζ : 土壌重量深度 [kg m^{-2}]
 η : 光子放出率 [-]
 θ : 角度 [rad]
 τ : 無次元移動距離 [mfp]
 $\bar{\tau}$: 無次元平均移動距離 [mfp]
 μ : 線減衰係数 [m^{-1}]
 μ_s : 土壌の線減衰係数 [m^{-1}]
 μ_a : 空気の線減衰係数 [m^{-1}]
 ρ : 土壌の密度 [kg m^{-3}]
 ϕ : 光子フルエンス率 [$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$]

参 考 文 献

- 1) H. L. BECK, J. DeCAMPO and C. GOGOLAK; In situ Ge(Li) and NaI(Tl) Gamma-ray spectrometry, Health and Safety Laboratory, U.S. Atomic Energy Commission (1972).
- 2) K. M. MILLER and P. SHEBELL; In situ gamma ray-spectrometry, A tutorial for environmental radiation scientists, Environmental Measurements Laboratory, U.S. Department of Energy (1993).
- 3) G. KIS-BENEDEK; In situ gamma ray-spectrometry, Workshop on Understanding and Evaluating Radioanalytical Measurement Uncertainty, Seibersdorf, Austria, 5–16, (2007).
- 4) International Commission on Radiation Units and Measurements; “Gamma-ray spectrometry in the environment”, ICRU Report 53 (1994).
- 5) K. SAITO and N. PETOUSSI-HENSS; Ambient dose equivalent coefficients for radionuclides exponentially distributed in the ground, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **51**, 1274–1287 (2014).
- 6) K. SAITO and P. JACOB; Fundamental data on environmental Gamma-ray fields in the air due to sources in the ground, JAERI-Data/Code 98-001 (1998).
- 7) T. SATO, K. NIITA, N. MATSUDA, S. HASHIMOTO, Y. IWAMOTO, S. NODA, T. OGAWA, H. IWASE, H. NAKASHIMA, T. FUKAHORI, K. OKUMURA, T. KAI, S. CHIBA, T. FURUTA and L. SIHVER; Particle and heavy ion transport code system PHITS, Version 2.52, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **50**, 913–923 (2013).
- 8) X-5 Monte Carlo Team; MCNP—A general Monte Carlo N-Particle transport code, Version 5 Volume I: Overview and Theory, LA-UR-03-1987, Los Alamos National Laboratory (2003).
- 9) D. SATOH, K. KOJIMA, A. OIZUMI, N. MATSUDA, H. IWAMOTO, T. KUGO, Y. SAKAMOTO, A. ENDO and S. OKAJIMA; Development of a calculation system for the estimation of decontamination effects, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **51**, 656–670 (2014).
- 10) D. SATOH, T. FURUTA, F. TAKAHASHI, C. LEE and W. E. BOLCH; Simulation study of personal dose equivalent for external exposure to radioactive cesium distributed in soil, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **54**, 1018–1027 (2017).
- 11) Research Committee on Shielding Handbook; “A Handbook of Radiation Shielding —basics—”, pp. 221–223 (2015), Atomic Energy Society of Japan (in Japanese).
- 12) T. KOSAKO and N. SASAMOTO; “Radiation Shielding”, pp. 41–50 (2010), Ohmsha, Tokyo (in Japanese).
- 13) T. NAKAMURA; “Radiation Physics and Accelerator Safety Engineering”, pp. 113–116 (2001), ChijinSyokan, Tokyo (in Japanese).
- 14) H. HIRAYAMA, T. SANAMI and Y. NAMITO; Study on gamma-ray spectrum at height of 1 m from radionuclide widely distributed on soil surface using EGS5 Monte Carlo code, *Trans. At. Energy Soc. Japan*, **12**, 222–230 (2013) (in Japanese).
- 15) T. OMORI, S. KATO, M. KIM and S. NUKATSUKA; Monte Carlo calculation for radiation dose prediction, Easily predicting Monte Carlo method for indoor radiation dose (Part 1), *J. Environ. Eng., AIJ*, **81**, 835–843 (2016) (in Japanese).
- 16) T. OMORI, S. KATO, M. KIM and S. NUKATSUKA; Radiation dose prediction for detached houses, Easily predicting Monte Carlo method for indoor radiation dose (Part 2), *J. Environ. Eng., AIJ*, **82**, 481–489 (2017) (in Japanese).
- 17) WolframAlpha, Available at: <https://www.wolframalpha.com>, Accessed 10 May 2017.
- 18) AESJ Standard; “Radiation dose conversion coefficients for radiation shielding calculations: 2010”, AESJ-SC-R002:2010, (2010) Atomic Energy Society of Japan (in Japanese).
- 19) AESJ Standard; “Gamma-Ray Buildup Factors: 2013”, AESJ-SC-A005:2013, (2013) Atomic Energy Society of Japan (in Japanese).
- 20) K. SAITO and S. MORIUCHI; Development of a Monte Carlo code for the calculation of gamma ray transport in the natural environment, *Radiat. Prot. Dosim.*, **12**, 21–28

(1985).

- 21) Mass attenuation, energy-transfer and energy-absorption coefficients. Ver. 4, Available at: <http://www.fujita-hu.ac.jp/~hid-kato/freesoft.html/>, Accessed 30 September 2014.
- 22) H. HIRAYAMA, Y. NAMITO, A. F. BIELAJEW, S. J. WILDERMAN and W. R. NELSON; The EGS5 Code System, SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8 (2005).
- 23) T. OHARA, Y. MORINO and A. TANAKA; Atmospheric behavior of radioactive materials from Fukushima Daiichi nuclear power plant, *J. Natl. Inst. Public Health*, **60**, 292-299 (2011) (in Japanese).

大森 敏明（おおもり としあき）

慶應義塾大学工学部卒業。博士（工学）（北海道大学）。東京ガス（株）技術研究所で燃焼，伝熱，および建築環境に関する研究に従事。同社退職後，東京大学生産技術研究所で建物内の線量率の数値計算を行い，その経験から簡易計算法の開発に取り組む。

E-mail: omori001@iis.u-tokyo.ac.jp