

教育用のモンテカルロ法光子中性子輸送計算コード S-Monte の開発

松村 哲夫^{*1} 亀山 高範^{*2}

Development of an Educational Monte Carlo Method Code "S-Monte" for Photon and Neutron Transport Calculation

by

Tetsuo MATSUMURA^{*1} and Takanori KAMEYAMA^{*2}

(Received on Mar. 31, 2020 and accepted on Jul. 24, 2020)

Abstract

We developed an educational Monte Carlo method code, "S-Monte" for photon and neutron transport calculation. By using Microsoft Excel VBA, the code is compact, intuitive to use, and has a user-friendly interface. Verification calculations were performed for dose evaluation and radiation shielding problems of gamma rays by comparing with the PHITS code. Benchmark calculations were also done for neutron multiplication factors of nuclear reactor cores. The S-Monte code has an auxiliary function to estimate the positions and intensities of environmental radiation sources. The code is open for the public, and is useful for both students and trainees.

Keywords: Radiation dose evaluation, Source estimation, Monte Carlo method, User-friendly, Excel VBA

1. まえがき

環境中に放出された放射性核種あるいは放射線施設などの放射線源による放射線の空間線量は住民および従事者の被ばく線量評価に必須な情報である。このため、 γ 線(光子)・中性子の遮蔽・線量の各種の計算法と計算コードが開発されている。計算法としてはモンテカルロ法が代表的であり、PHITS¹⁾, MCNP²⁾, MVP/GMVP³⁾などのコードが開発され、実務で使われている。モンテカルロ法コードは精度の高い遮蔽・線量計算が可能であるが、利用に当たっては専門的な知識と訓練が必要である。

モンテカルロ法の理解のため、初学者にも理解し易い教育用モンテカルロ法コード「S-Monte」を開発した。S-Monteは放射線の線量評価および線源推定(位置・強度)の機能を持つとともに、計算体系の入力をXYZ座標に限定するなど一部を直感的にし、MicrosoftのExcel VBAを用いることで初心者でも簡便に利用できる。また、本コードでモンテカルロ法の基礎、使用法を学習することにより、実務で使われるモンテカルロ法の理解と利用が容易になると考えられる。

本コードは多群の3次元輸送計算を行うため、 γ 線(光子)・中性子の多群計算ライブラリを用意すれば、各種の遮蔽・線量計算、中性子の増倍率計算が可能である。既に、本コードで利用可能な γ 線線量評価用の計算ライブラリを装備しているため、環境中の γ 線源による建屋内外の空間線量など、実務的な線量評価を実施できる。

2. 計算方法

S-Monteには標準的な多群のアナログモンテカルロ計算手法を用いている⁴⁻⁶⁾。本章では利用したアナログモンテカルロ計算手法の概要を説明する。

2.1 粒子の発生・移動

粒子がFig. 1に示す様に領域(region) R内の位置 $\mathbf{r}$ で発生、単位方向(direction)ベクトル $\boldsymbol{\Omega}$ に沿って運動、領域Rの全断面積(線減衰係数)は Σ_t とする場合、粒子が $\boldsymbol{\Omega}$ 方向に距離(distance) r を移動する間に物質と反応する割合(reaction rate: p)は式(1)及びFig. 2の様に示される。

$$p(r) = \exp(-r\Sigma_t). \quad (1)$$

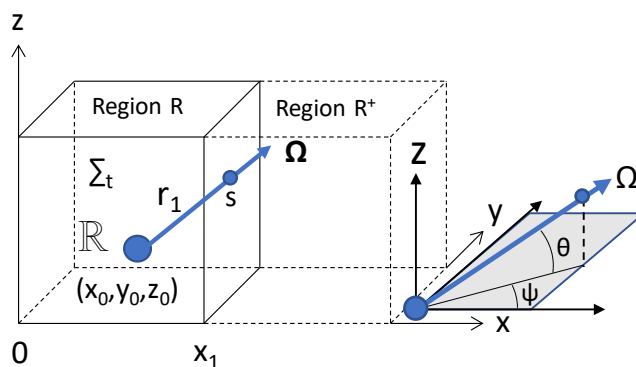


Fig. 1 Geometry of analog Monte Carlo calculation.

モンテカルロ法では、乱数を用いて粒子が反応までに移動する距離 r_p を求める。このため、Fig. 2の反応割合

^{*1} 工学部原子力工学科非常勤講師

^{*2} 工学部原子力工学科教授

p から移動距離 r_p を計算する. p 値に 0~1 の範囲の乱数 ξ を適用し, 幅の同じ(a)と(b)の範囲に乱数が発生した場合, これに対応した距離 r の幅(c)と(d)を比べると, (c)が(d)より狭くなる. 幅が狭いため, 特定の距離 r (微小な δr の範囲) に移動する粒子数は, (c)の数が(d)の数より多くなり, この分布も $\exp(-r\Sigma_t)$ に従う. このため, p 値から逆関数(inverse function)で距離 r を求めれば, 粒子の移動距離が求められる. 距離 r と反応割合 p の逆関数は式(2)であり, 乱数(ξ)から式(3)で粒子の反応までの移動距離 r_p が求められる.

$$r(p) = -1/\Sigma_t \ln(p). \quad (2)$$

$$r_p(\xi) = -1/\Sigma_t \ln(\xi). \quad (3)$$

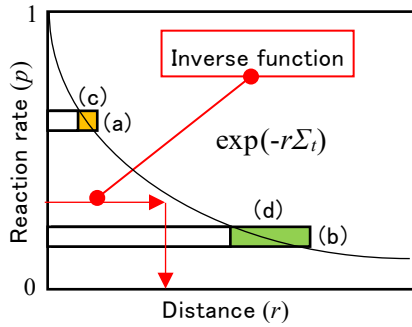


Fig. 2 Calculation method of particle moving distance in Monte Carlo method.

粒子が領域 R 内で一様に発生する場合, 発生位置 $\mathbb{R}$ の 3 次元直交座標 (x_0, y_0, z_0) は領域 R の各辺の長さ (x_1, y_1, z_1) から 0~1 の範囲の 3 つの乱数(ξ_1, ξ_2, ξ_3)を用いて式(4)で求められる.

$$x_0 = \xi_1 x_1, \quad y_0 = \xi_2 y_1, \quad z_0 = \xi_3 z_1. \quad (4)$$

粒子の発生位置が (x_0, y_0, z_0) で, 立体角 Ω の z 軸への仰角が θ , xy 面での x 軸との夾角 (方位角) が ψ の場合, 直方体の x_1 面(s 点)への距離 r_1 は式(5)で計算できる.

$$r_1 = (x_1 - x_0)/\cos\theta/\cos\psi. \quad (5)$$

粒子の方向 Ω が立体角 4π 方向に均等である場合, θ と ψ は乱数(ξ_4, ξ_5)を用いて式(6), (7)で計算できる.

$$\psi = 2\pi\xi_4. \quad (6)$$

$$\sin\theta = 2\xi_5 - 1. \quad (7)$$

立体角の構造から z 軸への仰角 θ が $\pm\pi/2$ 方向近傍に発生する粒子数 $p(\theta)$ は, 0 方向より少なく, $\cos\theta$ の分布確率となる. $\sin\theta$ の微分値は $d\sin\theta/d\theta = \cos\theta$ であり, $\sin\theta$ を式(7)の様に乱数 ξ から計算することで, 発生分布 $p(\theta)$ が $\cos\theta$ となる.

式(3)で計算される移動距離 r_p が直方体表面の s 点へ

の距離 r_1 より大きい場合, 粒子は領域 R から出て隣の領域 R^+ に移動することになる. 隣の領域 R^+ にて, 領域の境界点 s を起点として, Ω 方向の粒子について, 再度, 式(3)を用いて粒子の移動距離を計算する.

2.2 粒子の反応

r_p が r_1 より小さい場合, 領域 R 内で粒子が反応を起こすことになる. 粒子の反応断面積には, 捕獲断面積 Σ_c と核分裂反応断面積 Σ_f の合計である吸収反応断面積 Σ_a および散乱断面積 Σ_s がある. これらの反応断面積の合計($\Sigma_a + \Sigma_s$)が全断面積 Σ_t であるが, 散乱反応には中性子の(n, 2n)反応や γ 線の電子対生成反応などが含まれ, 散乱を起こす粒子の数より散乱で生成される粒子の数が増える場合がある. エネルギー群 g から g' に散乱される粒子の断面積の総和 $\Sigma'_s(g)$ は $\Sigma_s(g)$ より大きくなり, 式(8)で計算される.

$$\Sigma'_s(g) = \sum_{g'} \Sigma_s(g \rightarrow g'). \quad (8)$$

粒子が領域 R 内で反応を起こす場合, どの反応を起こし, 散乱反応の場合, どのエネルギー群に散乱するかを乱数 ξ を用いて決める. この場合, 全断面積 Σ_t ではなく, 式(9)で定義される修正全断面積 $\Sigma'_t(g)$ を用いる点に注意が必要である.

$$\Sigma'_t(g) = \Sigma_a(g) + \Sigma'_s(g). \quad (9)$$

例えば, 乱数 ξ が $\Sigma_a(g)/\Sigma'_t(g)$ より小さい場合, 吸収反応を起こすと判断する. 粒子には予め発生時に重み $W=1$ を与え, $\Sigma'_t(g)$ と $\Sigma_t(g)$ が異なる場合には粒子が持つ重みに $\Sigma'_t(g)/\Sigma_t(g)$ を掛算して粒子数のバランスを調整する.

粒子は発生, 領域・位置の移動, 反応などを繰り返す. 粒子が計算体系の外側に出た場合に粒子の追跡を終了し, 新しい粒子を発生する. 粒子が吸収反応を起こし, その一部が核分裂反応となる場合, 粒子の持つエネルギーを核分裂スペクトルのエネルギーに変更し, 粒子の追跡を継続する. その際, 粒子の持つ重み W を式(10)で修正する.

$$W' = W \cdot \nu \Sigma_f / \Sigma_a. \quad (10)$$

ここで, ν は核分裂の際の中性子発生数である. 核分裂反応が無い場合, 粒子は捕獲反応を起こし, 後述する非アナログ吸収オプションを利用しない場合, 粒子の追跡を終了し, 新しい粒子を発生する.

2.3 粒子の散乱反応

粒子が散乱する場合, エネルギー群 g から g' に散乱された後, 角度依存の散乱断面積を考慮して散乱方向を計算する必要がある. 粒子の散乱前後の単位方向ベクトル Ω と Ω' の夾角 η の $\cos\eta = \mu$ は散乱前後(b, a)の単位方向ベクトルの内積の式(11)で計算される.

$$\mu = \cos \eta = x_b x_a + y_b y_a + z_b z_a. \quad (11)$$

ここで、散乱前： $(x_b, y_b, z_b) = (\cos \theta \cos \psi, \cos \theta \sin \psi, \sin \theta)$ ，
散乱後： (x_a, y_a, z_a) の単位方向ベクトルである。

非等方で角度依存の散乱断面積 $\Sigma_s(\mu)$ は、 μ を変数とする P_n (n 次のルジャンドル多項式) と P_n 成分の断面積 (Σ_s^n) で与えられ、式(12)で計算される。

$$\Sigma_s(\mu) = \sum_n (2n+1) \Sigma_s^n P_n(\mu). \quad (12)$$

ここで、 P_n は、 $P_0=1, P_1=\mu, P_2=(3\mu^2-1)/2, P_3=(5\mu^3-3\mu)/2$ などである。例として ^{60}Co から放出される γ 線エネルギー (1.17MeV と 1.33MeV のうち 1.33MeV) に対応する第 22 群 (Table 2 参照) での鉛の自群散乱断面積の μ 依存性を Fig. 3 に示す。散乱は前方散乱が大きく、3 次のルジャンドル多項式の近似では散乱角度 μ によっては負の値になる。これはルジャンドル多項式の次数が少なく、散乱断面積の μ 依存を細かく表現できないためである。

S-Monte では、粒子の散乱角度分布を Fig. 3 の様にするため、乱数の棄却法を用いている。その手順は次の通りである。

- 1) 粒子の方向 Ω' を式(6), (7)で発生し、散乱角度 μ 及び散乱断面積 $\Sigma_s(\mu)$ を式(11), (12)で得る。
- 2) 散乱断面積 $\Sigma_s(\mu)$ の最大値 Σ_s^M (Fig. 3 では約 8 barn) との比 $\Sigma_s(\mu)/\Sigma_s^M$ と新たな乱数 ξ と比較する。
- 3) 乱数 ξ が $\Sigma_s(\mu)/\Sigma_s^M$ 比より大きければ、求めた散乱後の粒子の方向 Ω' を棄却し、1)に戻り粒子の方向 Ω' を再計算する。

この乱数の棄却法で、散乱後の粒子の方向 Ω' の散乱角 μ の分布を Fig. 3 の様な形にすることができる (但し、負の散乱断面積となる角度には粒子を発生しない)。

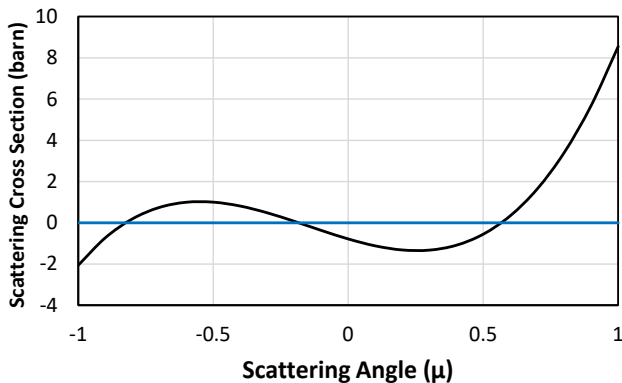


Fig. 3 Angle dependent scattering cross section.

2.4 γ 線計算ライブラリ

S-Monte では、核データライブラリ JENDL-4.0⁷⁾ をベースにした多群ライブラリ MATXS-LIB-J4⁸⁾ から本コードで γ 線線量評価に用いる 42 群の計算ライブラリを装備している。Table 1 にこの計算ライブラリに納めた 25 個の元素と同位体を、Table 2 に計算ライブラリの群構造と

後述の線量換算係数(dose conversion factor)を示す。このエネルギー群構造は、 ^{60}Co , ^{137}Cs から放出される γ 線エネルギーなど、計算対象となる γ 線のエネルギー範囲を考慮して設定されている。

S-Monte は P_5 まで対応可能であるが、後述の検証計算の結果などから、現在の計算ライブラリでは、短い計算時間で十分な計算精度が得られる P_3 近似としている。

Table 1 Elements and isotopes in library.

H, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, S, Cl, Ar, K, Ca, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zr, Mo, W, Pb, ^{235}U , ^{238}U
--

Table 2 Group structure and dose conversion factors.

Gr.	Upper energy (eV)	Lower energy (eV)	Dose conversion factor ($\mu\text{Sv/h vs } 1/\text{cm}^2/\text{s}$)
1	5.00E+07	3.00E+07	0.1715
2	3.00E+07	2.00E+07	0.1370
3	2.00E+07	1.40E+07	0.1110
4	1.40E+07	1.20E+07	0.0922
5	1.20E+07	1.00E+07	0.0818
6	1.00E+07	8.00E+06	0.0701
7	8.00E+06	7.50E+06	0.0644
8	7.50E+06	7.00E+06	0.0623
9	7.00E+06	6.50E+06	0.0597
10	6.50E+06	6.00E+06	0.0560
11	6.00E+06	5.50E+06	0.0530
12	5.50E+06	5.00E+06	0.0503
13	5.00E+06	4.50E+06	0.0476
14	4.50E+06	4.00E+06	0.0447
15	4.00E+06	3.50E+06	0.0415
16	3.50E+06	3.00E+06	0.0376
17	3.00E+06	2.50E+06	0.0335
18	2.50E+06	2.00E+06	0.0292
19	2.00E+06	1.66E+06	0.0253
20	1.66E+06	1.50E+06	0.0228
21	1.50E+06	1.34E+06	0.0211
22	1.34E+06	1.33E+06	0.0201
23	1.33E+06	1.00E+06	0.0181
24	1.00E+06	8.00E+05	0.0148
25	8.00E+05	7.00E+05	0.0127
26	7.00E+05	6.00E+05	0.0112
27	6.00E+05	5.12E+05	0.00979
28	5.12E+05	5.10E+05	0.00907
29	5.10E+05	4.50E+05	0.00856
30	4.50E+05	4.00E+05	0.00763
31	4.00E+05	3.00E+05	0.00632
32	3.00E+05	2.00E+05	0.00452
33	2.00E+05	1.50E+05	0.00315
34	1.50E+05	1.00E+05	0.00228
35	1.00E+05	7.50E+04	0.00168
36	7.50E+04	7.00E+04	0.00149
37	7.00E+04	6.00E+04	0.00141
38	6.00E+04	4.50E+04	0.00130
39	4.50E+04	3.00E+04	0.001195
40	3.00E+04	2.00E+04	0.000940
41	2.00E+04	1.00E+04	0.000453
42	1.00E+04	1.00E+03	4.22E-05

2.5 分散および標準偏差

モンテカルロ法では、粒子の追跡を 1 万回程度（デフォルト値であり、任意に指定できる＝ヒストリー）繰り返す。領域毎に粒子のフラックス、反応量などの集計を行い、更に、これらの粒子の追跡および集計を 100 回程度（デフォルト値であり、任意に指定できる＝バッチ）繰り返す。つまり、粒子の追跡回数は 1 万ヒストリー×100 バッチの 100 万回程度となる。

領域毎の粒子のフラックス、反応量などのバッチ i での値 A_i の分散 V を式(13)で計算する。

$$V = \frac{1}{n-1} \left[\sum_i (A_i - A_{av})^2 \right]. \quad (13)$$

$$A_{av} = \frac{1}{n} \sum_i A_i. \quad (14)$$

ここで、 n はバッチ数、 A_{av} は式(14)で示される A_i の平均値である。また、式(13)の中で n ではなく $(n-1)$ で割算するのは「分散の不偏推定値」にするためである。さらに、式(13)を変形して、式(15)とする。

$$V = \frac{1}{n-1} \sum_i (A_i^2 - 2A_i A_{av} + A_{av}^2),$$

$$V = \frac{n}{n-1} \left[\frac{1}{n} \sum_i A_i^2 - 2A_{av} \frac{1}{n} \sum_i A_i + A_{av}^2 \right],$$

$$V = \frac{n}{n-1} \left[\frac{1}{n} \sum_i A_i^2 - A_{av}^2 \right]. \quad (15)$$

2.6 粒子のフラックス、反応量及び線量評価

S-Monte では領域毎に粒子のフラックス、反応量を集計し、放射線の線量評価などを行う。この集計方法として以下の 3 種類の集計を行う。

- (1) 粒子の飛行距離評価法(track length estimator)
- (2) 衝突評価法(collision estimator)
- (3) 面検出器評価法 (surface crossing estimator)

飛行距離評価法では粒子の飛行距離を集計し、Fig. 1 での領域内の移動距離 r_p を合計し、ヒストリー数で割算して、領域平均のフラックス ϕ が得られる。

衝突評価法では領域内の吸収反応を集計し、各領域での反応量を（吸収断面積 $\Sigma_a \times$ 領域体積）で割算して領域平均のフラックス ϕ が得られる。

面検出器評価法では領域を移動する際に、移動する粒子の数を集計し、領域間の粒子の流れ J が得られる。Fig. 1 の体系では、粒子の方向から $J/\cos\theta/\cos\psi$ で粒子の領域境界でのフラックス ϕ が得られる。この際、領域の正と負方向の流れから得られたフラックス ϕ^+ 及び ϕ^- を合計する必要がある。

こうして得られた領域毎のエネルギー群 g の粒子フラックス $\phi(g)$ から領域毎の線量率 H は式(16)により求められる。

$$H = \sum_g \phi(g) E_g. \quad (16)$$

ここで H は実効線量率($\mu\text{Sv/h}$)、 $\phi(g)$ はエネルギー群 g の粒子フラックス($1/\text{cm}^2/\text{s}$)、 E_g は線量換算係数($\mu\text{Sv/h}$ vs $1/\text{cm}^2/\text{s}$)である。線量換算係数は日本原子力学会標準の「放射線遮へい計算のための線量換算係数: 2010」⁹⁾に準拠している。

S-Monte では、 γ 線線量評価用の 42 群のファイルに、日本原子力学会標準の線量換算係数の附属書 B 表 B.4 VITAMIN-B6 群構造に対応した γ 線の線量換算係数を収めている。但し、MATXSLIB-J4 の第 1 群のエネルギー範囲が 30～50MeV であり、VITAMIN-B6 群構造の上限エネルギー 30MeV と異なるため、附属書 A 表 A.1 人体に入射する光子のエネルギー別線量換算係数を基に第 1 群の線量換算係数を計算した。計算から得られた γ 線の線量換算係数を Table 2 に示す。

2.7 S-Monte の計算の流れ

ここまでの S-Monte の計算方法を順次説明してきた計算の流れを Fig. 4 にまとめ、全体像を紹介する。

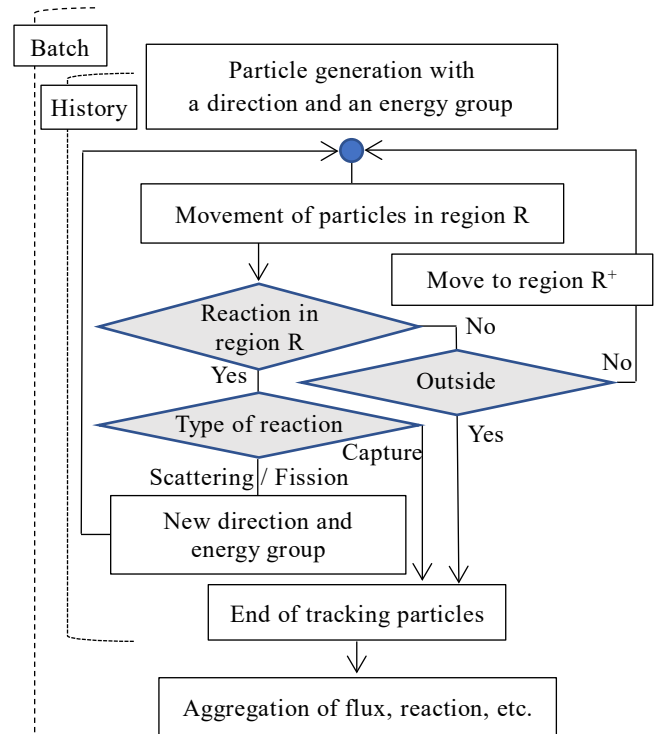


Fig. 4 Calculation flow of S-Monte.

式(4)で領域 R 内の粒子発生(particle generation)の位置を、式(6), (7)で粒子運動の方向をそれぞれ求める。エネルギー群は線源により決まる。例えば、 ^{137}Cs の γ 線エネルギーは 0.662MeV であり、Table 2 の第 26 群のエネルギー範囲(0.6～0.7MeV)に相当するため、 ^{137}Cs は第 26 群の線源となる。

粒子の領域 R 内の移動距離を式(3)で求め、粒子は領域

R内で反応を起こすか否かを式(5)などを用いて判定する。反応を起こさない場合、粒子は領域Rを出る。これが計算体系の外になれば、粒子の追跡を終了する。隣の領域R'に移動した場合、領域R'内での移動距離を式(3)で求め、粒子の追跡を継続する。

領域R内で反応を起こした場合、その反応が散乱(scattering)あるいは核分裂(fission)の場合と捕獲(capture)の場合で取り扱いが異なる。捕獲反応の場合、粒子の追跡を終了する。散乱の場合、新しい粒子の方向とエネルギー群を求めて粒子の追跡を継続する。散乱に非等方性がある場合は2.3節で述べた手順で計算する。核分裂反応の場合、核分裂スペクトルからエネルギー群を求め、粒子の方向は立体角 4π 方向に均等であると考え、式(6)、(7)で粒子の方向を求める。

粒子の追跡をヒストリー一回繰り返した後、粒子のフラックス、反応量などを集計・保存(aggregation)し、さらにこれをバッチ一回繰り返して、式(14)、(15)から平均値と分散値を求める。

2.8 中性子増倍率計算

中性子増倍率の計算では、核分裂の際の中性子発生数 ν を調整して臨界状態を実現し、その ν の調整値を中性子増倍率 k とする。このため、元の断面積 $\nu\Sigma_f$ から計算バッチで得られた $\nu\Sigma_f$ 反応量を集計し、 k を求め、 $\nu'=\nu/k$ と ν 値を調整した上で次のバッチ計算を行う。これを繰り返すことで安定した k を求める。S-Monteでは、計算の簡素化のため、個々の $\nu\Sigma_f$ 反応を記録せず、 $\nu\Sigma_f$ 反応量を領域毎で集計し、次の計算バッチの線源としている。このため、領域体積を過度に大きく設定すると、 k の計算に誤差が生じる可能性がある。

中性子増倍率計算では、中性子の追跡中に核分裂反応を起こした場合、粒子の重み W の調整を式(10)ではなく、式(17)の様に直前の計算バッチまでに得られた増倍率の平均値 k_{av} を反映する。

$$W' = W \cdot \nu\Sigma_f / \Sigma_a / k_{av}. \quad (17)$$

また、増倍率計算は計算開始後10バッチ程度(デフォルト値であり、任意に指定できる)までは中性子の核分裂分布が安定しないため、この10バッチを除き、以後のバッチの中性子の核分裂の発生量と分布を用いる。

2.9 線源位置強度推定機能

モンテカルロ法では線源から粒子の発生、移動、反応を追跡して検出器位置の線量を計算する。随伴計算は、この追跡を逆行を行うことで、検出器から見た線源の影響(インポートランス)を計算できる。検出器を点線源と考え、 g 群から g' 群への散乱断面積を g' 群から g 群への散乱と見なすことで随伴計算が可能となる。

随伴計算を行うことで、複数の検出器(これらを i とする)があれば、検出器 i の線量から線源の位置と強度を推定できる。検出器 i で線量率 D_i ($\mu\text{Sv/h}$)を与える位置 $\mathbb{R}$ の線源強度 $S_i(\mathbb{R})$ は式(18)で計算される。言い換えれば、位置 $\mathbb{R}$ に強度 $S_i(\mathbb{R})$ の線源があれば、検出器 i で線量率 D_i

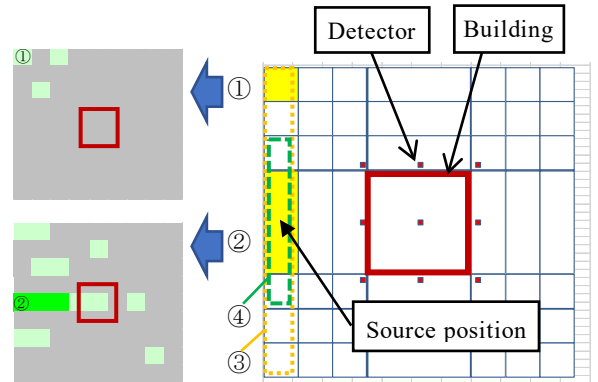
を示すことを意味している。

$$S_i(\mathbb{R}) = \phi_i^T(\mathbb{R}) D_i. \quad (18)$$

ここで、 $\phi_i^T(\mathbb{R})$ は検出器 i の $\mathbb{R}$ 位置の随伴線束である。複数の検出器 i からそれぞれ求められる $S_i(\mathbb{R})$ が一致すれば、線源が $\mathbb{R}$ の位置にあると推定できる。このため、 $S_i(\mathbb{R})$ の分散を計算し、これが最小となる位置を線源位置と推定する。Fig. 5に示す幅10m四方、高さ3mの建屋の中心および建屋の外側9カ所に検出器を高さ1mと0.25mの位置に置き(図中の9カ所の点)、検出器の線量から建屋の周囲の土壌に含まれる ^{137}Cs の位置と強度を推定した。線源が①あるいは②の位置(セル)の土壌に 1Bq/cm^3 ある場合の標準偏差の分布をFig. 5(a)に示す。緑色(最小の標準偏差の2倍以内)および薄緑色(最小の標準偏差の3倍以内)のセルにて分散が小さいことを表す。この様に本手法で線源位置がある確度で推定できる。但し、検出器から推定される線源強度の平均値は1.5および9.0 Bq/cm^3 となり本来の 1Bq/cm^3 との差異が見られ、分散マップも曖昧である。これらは随伴線束の計算精度が不足しているためであり、随伴計算に必要な長い計算時間が課題である。

線源が複数の位置に分布している場合も考えられる。本手法では、複数の線源分布のマッピングはできないが、線源の分布を仮定すれば、検出器の線量率 D_i から分布の妥当性と線源強度を推定可能である。線源が③の様に線状に7セルに亘って分布している場合、線源推定の相対的な分散の標準偏差は0.58であり、例えば②のセルにあると仮定した場合の値(0.87)および④の様に3セルに分布していると仮定した場合の値(0.90)より小さくなった。

検出器を点線源と考える随伴計算では2.6節で示した線量換算係数を点線源のエネルギー分布として計算する。



(a) Distribution of variance (b) Calculation geometry

Fig. 5 Estimation map of radiation source position.

2.10 分散低減のための計算オプション

モンテカルロ法は粒子を1個ずつ計算するため、線源から遠い領域、粒子を強く吸収する物質に近い領域では、粒子がその領域に到達しないあるいは到達する粒子数が少ない場合がある。このためモンテカルロ法では粒子を強く吸収する物質があっても粒子数の減少を防ぎ、計算

の分散を減らす工夫の機能が考えられている．S-Monte は分散の低減化のため、次の 3 種類の機能を用意する．

- (1) 指数変換(pass stretching)
- (2) ロシアンルーレット(Russian roulette)
- (3) 非アナログ吸収(non-absorption option)

指数変換では、入力する指数変換係数 β をもとに、全断面積に $(1-\beta)$ を掛算して、全断面積が大きい領域を通過するときの反応を減らし、線源から遠い領域に到達する粒子数を増やす．一方、粒子の重み W を調整する．粒子が領域を通過する場合に式(19)で、領域内で反応する場合に反応断面積も $(1-\beta)$ 倍になっているため式(20)で補正する．

$$W' = W \exp(-\beta \Sigma_t t_p). \quad (19)$$

$$W' = W \exp(-\beta \Sigma_t t_p) / (1 - \beta). \quad (20)$$

ロシアンルーレットでは、粒子の重み W が一定値 W_1 以下（デフォルト値は 10^{-5} ．任意に変更できる）になった場合にその粒子の追跡を継続するか終了するかを乱数 ξ を用いて決める方法である． W/W_1 と ξ を比較し、 $\xi \geq W/W_1$ の場合に追跡を終了する． $\xi < W/W_1$ の場合に粒子の追跡を継続し、その粒子の重み W を W_1 に戻す．

非アナログ吸収では、核分裂反応が無い場合、粒子が吸収反応を起こしても、粒子の追跡を終了せず、散乱されたと見なし、粒子の追跡を継続する．この際、粒子の重み W に Σ_s/Σ_t を掛算してバランスを調整する．

3. 検証計算

S-Monte は多群の 3 次元輸送計算を行うため、 γ 線および中性子の遮蔽・線量(radiation・dose)計算、随伴(adjoint)計算、中性子の増倍(multiplication)計算が可能である．S-Monte の計算機能を Table 3 にまとめる．本コードで利用可能な γ 線線量評価用の計算ライブラリを装備しているため、環境中の γ 線源による建屋内外の空間線量などの実務的な線量評価が実施できる．中性子あるいは中性子と γ 線結合の多群データまたは計算ライブラリを用意すれば、これらの計算も可能である．

Table 3 Calculation functions of S-Monte.

Calculation function	Gamma ray	Neutron	Neutron+ Gamma ray
Radiation・dose	◎	○	○
Adjoint	◎	○	○
Multiplication	-	○	○

◎: Feasible. Library is available.

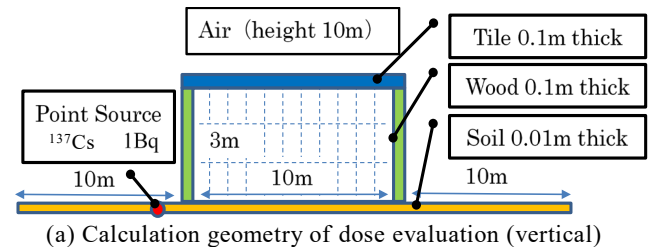
○: Can be carried out with macro cross section data or library.

S-Monte の計算性能を検証するため、多群ライブラリ MATXSLIB-J4 から作成した γ 線線量評価用の計算ライブラリを用いて、環境放射線源による線量計算および鉛、鉄体系での遮蔽計算を行い、粒子・重イオン輸送計算コード PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System)

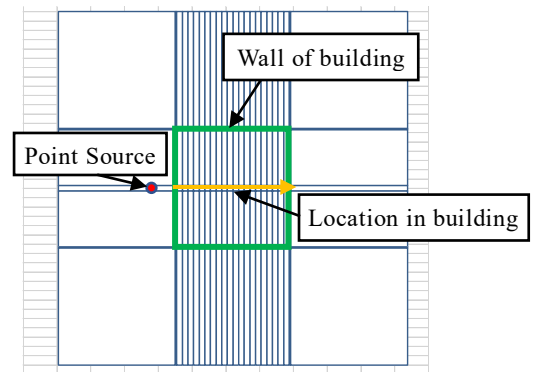
の計算結果と比較した．また、中性子増倍率計算の検証のため、マクロ断面積が与えられている小型軽水炉の臨界ベンチマーク問題を計算した．

3.1 線量評価

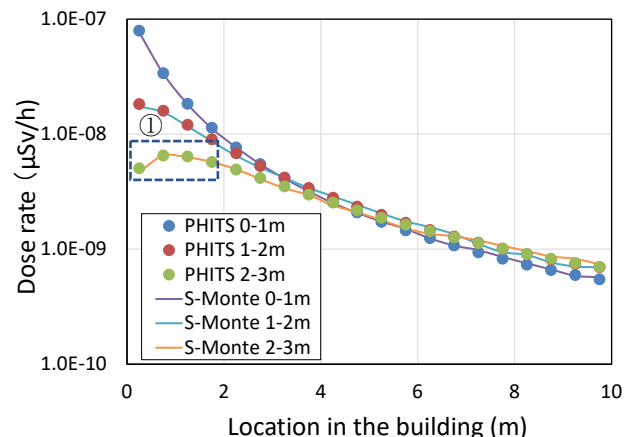
地表に堆積した ^{137}Cs による建屋内の空間線量率を評価した(Fig. 6)．問題の簡素化のため、Fig. 6 (a)に示す様に ^{137}Cs を地表から 1mm 深さ、建屋表面から 0.4m 離れた点線源として、建屋内の 1m 毎の高さ平均の線量率を固定線源計算により評価した．建屋は 10m 四方、高さ 3m として、壁および天井は厚さ 0.1m の木材および瓦とした．土壌、木材、瓦の元素組成には JAEA 報告書「環境に沈着した事故由来の放射線セシウムからの γ 線に対する建物内の遮蔽効果および線量低減効果の解析」¹⁰⁾を参照した．Fig. 6 (b) は計算体系の水平断面であり、S-Monte の MAP 表示機能を利用して計算領域を示す．線量率分布を S-Monte と PHITS で計算した値は、Fig. 6 (c)に示す様に相対誤差 5%以内でよく一致した．



(a) Calculation geometry of dose evaluation (vertical)



(b) Calculation geometry of dose evaluation (horizontal)



(c) Comparison of dose rate between S-Monte and PHITS

Fig. 6 Dose rate evaluation of environmental radioactivity.

高さ 2~3m の線源に近い位置(Fig. 6 (c)-①)で線源により近い方の線量率が低下する理由を分析した。Table 4 は ①の高さ 2~3m の 4 つの位置(location)で第 26 群 (^{137}Cs の線源のエネルギー相当群)の γ 線の流れを示す。線量率への寄与は線源から上方への流れ(upward)が中心であり、 γ 線が壁を透過する長さは壁に近い方で大きくなるため、 γ 線の流れが小さくなる効果が見られる。一方、天井などからの γ 線の散乱による下方への流れ(downward)は小さい。このため、線源に近い方の線量率が低下する理由は、壁の遮蔽効果が中心であると考えられる。S-Monte は粒子の流れを検出する面検出器評価機能を有しているため、このような分析が容易に実施できる。

Table 4 Gamma ray current into regions [unit: 1/cm²/s].

Location in building	0.0~0.5m	0.5~1.0m	1.0~1.5m	1.5~2.0m
Upward	4.50E-07	5.51E-07	4.39E-07	3.25E-07
Downward	1.80E-09	0.00E+00	1.80E-09	9.00E-10
Rightward	4.02E-08	1.44E-07	2.33E-07	2.42E-07

3.2 遮蔽計算

一辺 0.2m の Pb または Fe の立方体の中心に設置する ^{60}Co 点線源(8Bq)からの距離に対する線量率分布を固定線源計算により評価した。S-Monte と PHITS を比較し、Fig. 7 に示す様に両計算値は相対誤差 30%以内で一致した。但し、線源から離れた位置では差が拡大した。これは、減衰が 10^4 以上と大きい場合、S-Monte では粒子の到達が少ないためと考えられ、出力される計算結果の標準偏差(deviation)にも注意を払う必要がある。また、放射線施設の遮蔽計算実務(放射線)データ集(R.S. Manual)¹¹⁾に収録されている光子の実効線量透過率のデータと Fig. 7 中に比較し、これとも一致した。

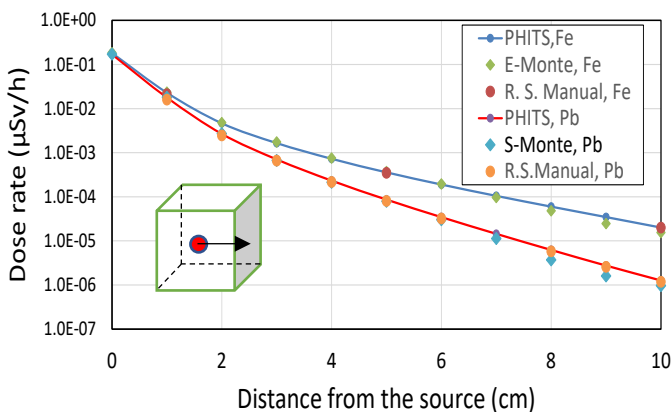


Fig. 7 Dose rate evaluation of radiation source.

3.3 臨界計算

OECD/NEA によって 1991 年に 3 次元輸送計算に関するベンチマーク(計算結果を持ち寄り比較検討する活動)が実施され、その結果が報告されている¹²⁾。その中の小型軽水炉の臨界ベンチマーク問題(model 1)を中性子増倍率計算により解析した。この問題の計算体系を Fig. 8 に示す。この問題では、炉心(core)の横に制御棒(control rod:

CR)が設置され、CR が引抜かれた場合(case 1)と挿入された場合(case 2)がある。この問題には、計算に使用される 2 群の巨視的断面積が Table 5 の様に与えられている。

Table 6 に計算した中性子増倍率と報告書に記された参照値を示す。この参照値はベンチマークに提出されたモンテカルロ法による計算値の平均と分散であり、制御棒の有無の場合(case 1, 2)ともに、S-Monte の計算値は参照値と分散の範囲内で一致した。本計算値は妥当と考えられる。

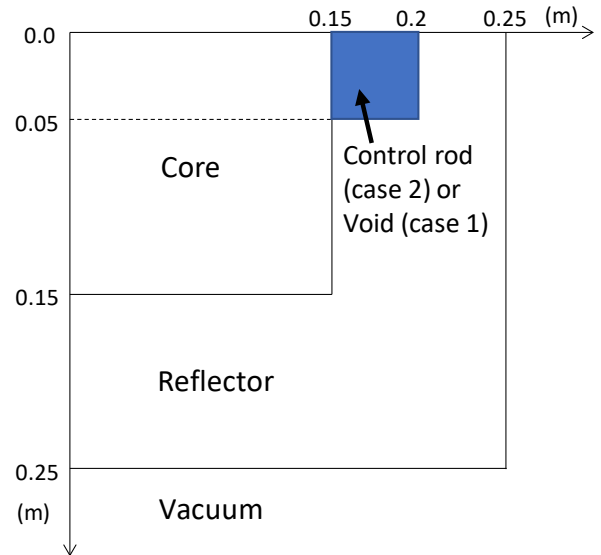


Fig. 8 Core configuration of model 1.

Table 5 Cross sections for model 1 [unit:1/cm].

g	$\Sigma_{tr}(g)$	$\Sigma_a(g)$	$\nu\Sigma_f(g)$	$\Sigma_s(1\rightarrow g)$	$\Sigma_s(2\rightarrow g)$
Core region					
1	2.24E-01	8.53E-03	9.09E-03	1.92E-01	0.00E+00
2	1.04E-01	1.58E-01	2.90E-01	2.28E-02	8.80E-01
Reflector region					
1	2.50E-01	4.17E-04	0.00E+00	1.93E-01	0.00E+00
2	1.64E+00	2.03E-02	0.00E+00	5.65E-02	1.62E+00
Control rod region (withdrawn)					
1	1.28E-02	4.66E-05	0.00E+00	1.28E-02	0.00E+00
2	1.21E-02	1.33E-03	0.00E+00	2.41E-05	1.07E-02
Control rod region (inserted)					
1	8.52E-02	1.74E-02	0.00E+00	6.77E-02	0.00E+00
2	2.17E-01	1.82E-01	0.00E+00	6.45E-05	3.52E-02

Table 6 k_{eff} of the benchmark calculations (model 1).

	Reference	S-Monte
Case 1 (Void)	0.9780 ± 0.0006	0.9774 ± 0.0012
Case 2 (CR)	0.9624 ± 0.0006	0.9611 ± 0.0008

4. 教育での活用

現在、本学工学部原子力工学科生を対象とする授業でも本コードを利用している¹³⁻¹⁵⁾。建屋(building)周辺の土壌表面に ^{137}Cs が分布した場合、建屋内の空間線量率は

Fig. 9 に示す様に建屋の壁の γ 線遮蔽効果により減衰する。学生は建屋の壁（木材とコンクリート）による遮蔽効果の差異を自ら計算し、理解を深めている (Fig. 10 参照)。さらに大学生・院生が本コードを積極的に利用し、モンテカルロ法の計算に習熟することも期待される。

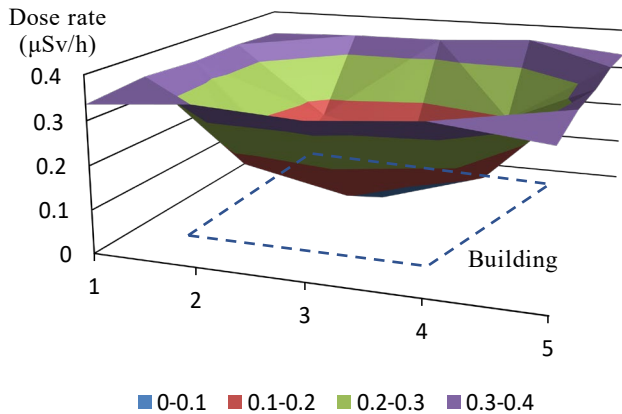


Fig. 9 Gamma ray shielding effect of building.

線量評価の実務

- 建屋が木材の場合とコンクリートの場合を比較すると、屋内の線量がコンクリートの場合1/4程度に低減します。
- これはコンクリートの密度が木材より高く、鉄やSiなどによる γ 線の遮蔽効果によるものです。

物質番号を木材(3)からコンクリート(4)に変化させる
(単位: $\mu\text{Sv/h}$)

位置	条件	壁が木材の場合	壁がコンクリートの場合
屋外(0~1m高さ)		0.345	0.341
屋外(1m~3m高さ)		0.215	0.209
屋内(0~1m高さ)		0.091	0.035
屋内(1m~3m高さ)		0.121	0.040

29

Fig. 10 Examples of teaching materials.

5. まとめ

環境中に放出された放射性核種あるいは放射線施設などの放射線源による放射線の空間線量の評価を目的として、簡便に利用できる教育用モンテカルロ法コード S-Monte を開発した。

Microsoft の Excel VBA を用いることで、Excel を利用している個人の計算機などでインストール作業なく、S-Monte の動作が可能である。S-Monte は検出器の線量率から線源の位置と強度を推定する機能も有している。また、計算体系の入力を XYZ 座標に限定するなど一部を直感的にし、さらに、Excel VBA の機能を用いて計算体系および計算結果を可視化する機能も装備している (Fig. 5 (b), Fig. 6 (b) 参照)。

MATXSLIB-J4 ライブラリから本コードで利用可能な

γ 線線量評価用の計算ファイルを作成し、地表の ^{137}Cs による建屋内の空間線量の計算、Pb または Fe 立方体の遮蔽計算を行い、それぞれ PHITS と比較して妥当な線量評価の結果を得た。また、小型原子炉の臨界ベンチマーク問題を解析し、中性子増倍率の計算について妥当な計算を行えることも確認した。

今後、大学などの教育に活用するとともに、S-Monte を公開・配布し、環境中の放射性核種による空間線量の評価の実務などにも適用する計画である。

参考文献

- Y. IWAMOTO, et al. : Benchmark study of the recent version of the PHITS code, Journal of Nuclear Science and Technology 54, 5, 617-635 (2017).
- X-5 Monte Carlo Team: MCNP — A general Monte Carlo n-particle transport code, version 5, LA-UR-03-1987 (2003).
- 長家康展, 奥村啓介, 櫻井健, 森 貴正 : MVP/GMVP 第3版: 連続エネルギー法及び多群法に基づく汎用中性子・光子輸送計算モンテカルロコード (翻訳資料), JAEA-Data / Code 2016-019 (2017).
- 小林啓祐 : 原子炉物理, コロナ社 (1996).
- 中村尚司 : 放射線物理と加速器安全の工学, 地人書館 (2001).
- 日本原子力学会 : 「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会 : 放射線遮蔽ハンドブック-基礎編- (2015).
- K. SHIBATA, et al. : JENDL-4.0 : A new library for nuclear science and engineering, Journal of Nuclear Science and Technology 48, 1, pp 1-30 (2011).
- K. OKUMURA : Nuclear data for prediction of isotope generation and depletion, JAEA-Conf 2012-001, pp.39-44 (2012).
- 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 : 2010, AESJ-SC-R002 -2010 (2010).
- 吉田琢哉, 高橋史明 : 環境に沈着した事故由来の放射線セシウムからのガンマ線に対する建物内の遮蔽効果および線量低減効果の解析, JAEA-Research 2014-003 (2014).
- 原子力安全技術センター : 放射線施設の遮蔽計算実務 (放射線) データ集(2015).
- T. TAKEDA, H. IKEDA : 3-D neutron transport benchmarks (NEACRP-L-330) (1991).
- 松村哲夫, 亀山高範 : 教育や現場で使い勝手の良い放射線量評価モンテカルロ法コード, 原子力学会 2019 年春の年会 2J13 (2019).
- 松村哲夫, 亀山高範 : 教育や現場で使い勝手の良い放射線量評価モンテカルロ法コード(2) PHITS との比較および教育での利用, 原子力学会 2019 年秋の大会 1H15 (2019).
- 松村哲夫, 亀山高範 : 教育や現場で使い勝手の良い放射線量評価モンテカルロ法コード(3) 放射線源の位置・強度推定機能の評価, 原子力学会 2020 年春の年会 1N10 (2020).