

フォールアウト⁹⁰Srの経口曝露変動と数理発がんモデルによるリスク評価

京都大学大学院 学生員 梶原洋和
 京都大学大学院 吉田 学
 京都大学大学院 フェロー 森澤眞輔

1. 序論

1950、60年代を中心に大気圏内核実験により大気中へ拡散した⁹⁰Srは現在も環境中に微量に存在し、低濃度ながら長期の汚染を引き起こしている。⁹⁰Srによる健康リスクを評価するにあたり、特に問題とされるのは高曝露集団であり、⁹⁰Sr曝露量の変動幅を明確に把握する必要がある。また、摂取後の⁹⁰Srが誘発するがんのリスク評価においては、広島・長崎原爆被爆者や職業被爆者による疫学データより得られるリスク係数ではなく、細胞が中間細胞を経て悪性細胞へと変化する過程を数式化した数理発がんモデルを適用することで、発がんリスク評価の信頼性の向上に繋がると思われる。本研究では日本人の⁹⁰Sr経口摂取量と骨中⁹⁰Sr濃度を平均値のみではなく変動を含めて評価し、数理発がんモデルを用いて⁹⁰Sr経口摂取に起因する発がんリスクを推定することを研究の目的とする。

2. ⁹⁰Sr 経口摂取量の変動評価

2-1 食品中⁹⁰Sr濃度の分布型

放射線医学総合研究所が報告している5種類の食品中⁹⁰Sr濃度¹⁾について、⁹⁰Sr濃度の変動特性を正規分布と対数正規分布のどちらによく近似されるかを、正規性を調べるプロットとLillifors probabilityの検定を用いて評価した。検定の結果、13種の食品中⁹⁰Sr濃度分布は表1で近似できると判断した。モニタリングデータの制約上、実測データによる分布型は5種の食品についてしか特定できなかったため、分布型が判断できない食品については、食品の類型に区分し、同じ類型内の分布型は相似であるとした。

2-2 モンテカルロシミュレーション

前項で決定した食品13種中の⁹⁰Sr濃度の分布型と摂取量の分布型により、各々の模擬乱数を10000個発生させ、以下の式で13種類の食品から摂取される⁹⁰Sr経口摂取量を求めた。ただし、各食品摂取量の分布型は食品毎に得られなかったため、日本人のカロリー摂取量またはタンパク質摂取量の分布²⁾と近似するとしている。

$$T_j = \sum_{i=1}^{13} D_{ij} \times C_{ij} \quad (j=1 \sim 10000) \quad (1)$$

T_j : ⁹⁰Sr経口摂取量の第j回目の計算値 [Bq/day・person]

D_{ij} : 食品iの摂取量の第j回目の仮想実現値 [kg/day・person]

C_{ij} : 食品i中⁹⁰Sr濃度の第j回目の仮想実現値 [Bq/kg]

10000回のモンテカルロシミュレーションを行い、1997年度の日本人の1人1日あたりの⁹⁰Sr経口摂取量を10000個のデータ(仮想実現値)として算出した。⁹⁰Sr経口摂取量と実測値による⁹⁰Sr経口摂取量の頻度分布を図1に示す。10、90パーセンタイル値の平均値に対する比率はそれぞれ0.6倍、1.7倍と計算され、モニタリングデータとほぼ等しい分布型が得られた。

3. 体内動態モデルによる骨中⁹⁰Sr濃度の変動評価

3-1 ⁹⁰Sr体内動態モデル

⁹⁰Sr体内動態モデル³⁾におけるコンパートメント間の⁹⁰Srの移行率(フラックス)は、コンパートメント内の⁹⁰Sr存在量に比例する。第iコンパートメントに対する支配方程式は一般的に以下の式で記述される。

$$\frac{dq_i}{dt} = \sum_j I_{j,i} - \sum_j I_{i,j} - \lambda_R \cdot q_i \quad (2)$$

$q_i(t)$: 第iコンパートメントにおける⁹⁰Srの存在量 [Bq]

λ_R : ⁹⁰Srの物理的崩壊定数 [1/day]

$I_{j,i}$: 第jコンパートメントから第iコンパートメントへの⁹⁰Sr移行率 [Bq/day]

食品中⁹⁰Sr濃度の変動に起因した⁹⁰Sr変動経口摂取量を入力値とし、各コンパートメントにおける常微分方程式(2)をオイラー法によって数値的に解くことにより、日本人の骨中⁹⁰Sr濃度を算出した。

キーワード : ⁹⁰Sr、モンテカルロシミュレーション、体内動態モデル、MVKモデル、発癌性

連絡先 : 京都市左京区吉田本町 京都大学工学研究科環境地球工学専攻環境リスク工学講座

TEL:075-753-5156 FAX:075-753-5066

表1 ⁹⁰Sr食品中濃度の分布型

正規分布	米類、小麦類、いも類、豆類、牛肉、豚肉、鶏肉、鶏卵、牛乳
対数正規分布	野菜類、果実類、魚介類、海藻類

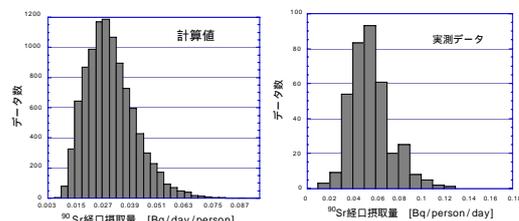


図1 モンテカルロシミュレーションによる⁹⁰Sr経口摂取量の計算値と実測値の頻度分布

4.MVKモデルによる発がん確率評価

4-1 MVKモデル

正常細胞が増殖を繰り返しながら、二回のヒットを受け悪性細胞まで変化するMVK二段階モデルの構成図を図2に示す。年齢t歳の日本人のある組織中の基幹細胞数をX(t)、中間細胞数をY(t)、悪性細胞数をZ(t)とする。基幹細胞数X(t)は $\mu_1(t)$ [1/yr]の割合で基幹細胞2つに分裂、 $\mu_1(t)$ [1/yr]の割合で分化または死滅、 $\mu_1(t)$ [1/yr]の割合で突然変異を起こし基幹細胞と中間細胞にそれぞれ分裂する。同様に中間細胞Y(t)は $\mu_2(t)$ 、 $\mu_2(t)$ 、 $\mu_2(t)$ の割合で分裂、死滅、突然変異を起こす。すなわち悪性細胞は $\mu_2(t)$ [1/yr]の割合で中間細胞から発生することとなる。各細胞における収支式をとることにより、MVK二段階モデルは次のように数式化される。

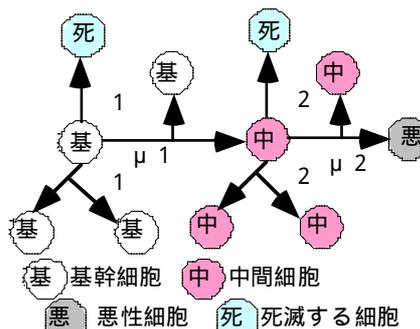


図2 MVKモデルの概念図

$$\frac{dE[X(t)]}{dt} = (\alpha_1(t) - \beta_1(t)) E[X(t)] \quad \frac{dE[Y(t)]}{dt} = (\alpha_2(t) - \beta_2(t)) E[Y(t)] + \mu_1(t) E[X(t)]$$

$$\frac{dE[Z(t)]}{dt} = \mu_2(t) E[Y(t)] \quad (3) \quad X(t): \text{年齢 } t \text{ 歳における組織中基幹細胞数}$$

Y(t): 年齢 t 歳における組織中中間細胞数

Z(t): 年齢 t 歳における組織中悪性細胞数 E[-] は期待値を表す
ハザード関数は組織に悪性細胞が一つもないという条件下における、悪性細胞の瞬間発生確率であり、ハザード関数 H(t)[1/yr] は次式で表される。
 $H(t) \approx \mu_2(t) \cdot E[Y(t)] \quad (Z(t) \approx 0) \quad (4)$ (式中 μ_2 は(6)式で定義)

悪性細胞が1つ生じてから個体の死亡に至るまでの期間を悪性細胞増殖期間 t' [yr]とし、治療による治癒率を $\gamma(t)$ とすると、日本人の年齢別発がん死亡率 $H_{death}(t)$ [death/yr・person]は(4)式のH(t)を用いて、
 $H_{death}(t) = (1 - \gamma(t)) \cdot H(t + t') \quad (5)$ と表される。

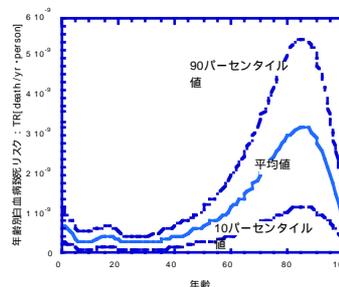


図3 年齢別白血病致死リスク

4-2 被曝線量依存パラメータのMVKモデルへの導入

MVKモデルで用いた突然変異パラメータに放射線被曝影響を導入し、放射線被曝による発がん確率を評価する。線量効果関係に線形モデルを用いると突然変異確率 $\mu_n(t,d)$ は次式で表される。

$$\mu_n(t, d) = \mu_n(t, d=0) \cdot (1 + b_n \times d) \quad (6)$$

$\mu_n(t,d)$: d[Sv/yr]の放射線を被曝した細胞の第nヒット目の突然変異確率[1/yr]
 b_n : 第nヒット目の線量依存係数[yr/Sv], d: 被曝線量率[Sv/yr]

5. 発がんリスク変動評価

5-1 発がんリスク評価指標

西暦B年生まれて性別sの日本人が、誕生以来の被曝によりN歳に(西暦B+N年に)放射線誘発によるがんで死亡するリスクTR(B,s,N)[death/yr・person]は次式で与えられる。

$$TR(B, s, N) = \sum_{\tau=B}^{B+N-1} \frac{(H_{death}(D, \tau - B, s) - H_{spon}(\tau - B, s))}{DDREF} \cdot S(\tau, \tau - B, s, B + N - 1) \quad (7)$$

$H_{death}(D, \tau - B, s)$: 内部被曝D[Gy]を受ける($\tau - B$)歳で性別sの人の発がん死亡率[death/yr・person]
 $H_{spon}(\tau - B, s)$: ($\tau - B$)歳で性別sの人の自然発がん死亡率[death/yr・person]
 $S(T, A, s, T+)$: 西暦T年にA歳で性別sの人が西暦(T+)年に生存している割合[-]
DDREF: 線量・線量率効果係数[-] (=2)

5-2 ⁹⁰Srによる過剰白血病致死リスク

MVKモデルを用いて1992年生まれの日本人の⁹⁰Sr経口摂取に起因する過剰白血病致死リスク(TR)を算出した。グラフの積分値が生涯の過剰白血病致死リスクを表し、 1.2×10^{-7} [death/person・lifetime]と計算された。変動幅は、90、10パーセント値で平均値の1.7倍、0.4倍となった。(図3)

参考文献

1) National Institute of Radiological Science "Radioactivity Survey Data In Japan" No.1 ~ No.125 (1963-1999)
2) 厚生省 "国民栄養調査" (1969-97) 3) 梶原 洋和ら "コンパートメントモデルによる⁹⁰Srの体内挙動解析" 平成13年度土木学会全国大会講演会概要集 部門(2001)