

30 放射性物質による市街地土壌汚染のリスク評価

Risk analysis of urban soil pollution with radionuclides.

京都大学 池上麻衣子 米田稔
中山亜紀 松井康人

Kyoto Univ. Maiko Ikegami, Minoru Yoneda, Aki Nakayama, Yasuto Matsui

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災に起因して発生した福島原発事故は、福島県そして関東地方までを汚染範囲とする放射性物質をまき散らした。子供らが通う学校校庭での空間線量暫定基準が4月19日に決められたが、累積線量が20mSv/yearとなる線量を基準としていたため、父兄等から多くの不安の声が上がり、結果として5月27日に文部科学大臣が暫定基準は撤回しないが、当面1mSv/year以下を目標とすると宣言する事態となっている。校庭などの基準に関して特に父兄らを不安にさせている原因の一つが内部被曝量を考慮した基準となっていないことがある。このため、本研究では子供らが校庭などの市街地土壌から被曝する種々の経路を想定し、土壌汚染対策法での基準値設定の基礎となっているシナリオを使用して、内部被曝と外部被曝の両方を考慮したときの、いくつかの基準値に相当する空間線量の値を推定した。

2. 被曝量評価の方法

2.1 想定した被曝経路

放射能で汚染された土壌からの想定される被曝経路としては図1のようなものがある。ここでは、市街地土壌を対象とし、この土地で農作物の栽培や家畜の飼育を行うことはないものとする。また、放射能が地下水へと移行し、飲料水となる地下水を汚染する場合や魚介類を汚染して経口摂取へと繋がるケースもあるが、喫緊に必要とされている校庭などで遊ぶことの安全性を検討する際には、考慮する必要のない経路であることから、ここでは考慮しないことにする。以上のことから本研究では、土壌粒子の直接摂取（摂食）と吸入摂取による内部被曝量、および地面からの外部被曝量を推定してみる。

2.2 直接摂取のシナリオ

直接摂取量を算定するには摂取シナリオが必要である。ここでは現在の土壌汚染対策法で使用されている重金属曝露に関する仮定を用いて内部被曝量を評価する。①摂食（吸入摂取したものが消化器系へ移動する場合を含む）、②汚染土壌の上に70年居住するとする。③土壌摂食のシナリオとして、(a)土壌摂食量：200mg/day（土壌汚染対策法での子供の摂食量）、(b)吸収率：1（食物や飲料水経由と比べて有意に低くなるというデータが無いため）、(c)曝露頻度：365日（土壌汚染対策法での値）、④皮膚接触（皮膚吸収）：皮膚吸収は経口摂取に比べ小さいとして無視する。これらの仮定の下、摂食による内部被曝量の算出は次式で行う。

(摂取量) = (土壌中含有濃度) × (土壌摂食量) × 365 日

一年間の預託実効線量(mSv) = Σ (実効線量係数(mSv/Bq) × 年間の核種摂取量(Bq))

ここで総和記号は核種についての総和であり、

実効線量係数は、単位量の放射性物質を摂取した場合に想定される70年間（大人の場合は50年間）の累積実効線量を表す定数で、核種、年齢、被曝経路ごとに与えられている。

表1 主な核種の実効線量係数(ICRP, 1996)

核種	大人経口摂取 (mSv/Bq)	5歳児経口摂取 (mSv/Bq)	大人吸入摂取 (mSv/Bq)	5歳児吸入摂取 (mSv/Bq)
Cs-134	1.9×10^{-5}	1.3×10^{-5}	2.0×10^{-5}	5.2×10^{-6}
Cs-137	1.3×10^{-5}	9.6×10^{-6}	3.9×10^{-5}	3.6×10^{-6}
Sr-90	2.8×10^{-5}	4.7×10^{-5}	1.6×10^{-4}	6.5×10^{-5}

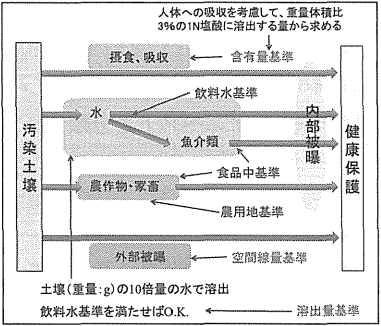


図1 想定される被曝経路

2.3 基準値の設定方法(土壌汚染における要処置レベルの考え方)

重金属やダイオキシンの場合は、土壌粒子の経口摂取による曝露量が耐容1日摂取量の概ね10%程度、あるいは基準濃度の飲料水からの摂取量と同程度となるように設定する。これは農薬などの基準値設定において、概ね作物から8割、飲料水から1割、その他から1割程度の経口摂取を仮定するためである。放射能の場合は、外部被曝量と内部被曝量があり、これら2つを基準値に対し、どのように割り振るかが問題となる。このため本研究では、その土壌上での空間線量を基準として、対応する外部被曝量と内部被曝量を推定し、土壌による内部被曝の10倍と外部被曝量の合計が基準値以下となる空間線量を設定することを提案する。実際、土壌中の含有量を測定するよりも空間線量を測定の方が簡易であり、実際の被曝管理にも適用しやすいと考えられる。このため、本研究では以下のようにして、空間線量と外部・内部被曝量の関係を推定した。

3 空間線量と土壌中濃度の関係

3.1 空間線量と土壌表面汚染密度の関係

今中らによる3月31日における飯館村曲田での測定結果¹⁾を元にして、今後の主たる外部被曝源となると考えられるCs-134とCs-137に起因する空間線量を見積もる。測定日である3月31日におけるこの場所での地上1mでの空間線量は、24μSv/hであった。各核種の幾何効率が同じと仮定して、土壌粒子による減衰を無視すると空間線量への寄与は核種量と線量当量率定数の積に比例するから表2のようになり、曲田でのCs-134とCs-137に起因する空間線量は15μSv/h程度となる。よって、汚染後数ヶ月程度が経過し、Cs-134とCs-137以外が無視できるようになり、Cs-134とCs-137の減衰が無視できる場合、表2より空間線量(μSv/h)から汚染濃度(kBq/m²)を求めるには、Cs-134で約130倍、Cs-137で約150倍すれば良いことになる。

表2 表面汚染濃度と空間線量の関係(汚染濃度データは文献1)より)

核種	汚染濃度 (kBq/m ²)	1cm線量当量率 定数(μSv m ² /MBq/h)	半減期	空間線量 寄与率(%)	空間線量寄与 推定値 (μSv/h)	空間線量からの汚 染密度変換係数 (kBq/m ²)/(μSv/h)
Te-129m	50.2	0.0115	33.6d	0.05	0.01	-
Te-129	55.7	0.0136	69.6m	0.07	0.02	-
I-131	3244	0.066	8.02d	19.81	4.75	-
Te-132	518	0.0552	3.204d	2.65	0.63	-
I-132	338	0.353	2.295h	11.04	2.65	-
Cs-134	1873	0.249	2.058y	43.15	10.36	126
Cs-136	146	0.33	13.1d	4.46	1.07	-
Cs-137	2188	0.0927	30.17y	18.77	4.50	147

3.2 空間線量からの土壌中濃度の推定

今後の被曝量への寄与を考慮して、Cs-134とCs-137について検討する。土壌表面汚染密度を土壌中濃度へ変換するには、Csの場合、上層5cm程度に全量の90%程度が保持されていたという報告などもあることから、地表面から汚染濃度が指数関数的に減少し、深さx cmでの濃度が $A \cdot \exp(-k x)$ で表されるとすると、深さ5cmまでに全体の90%が存在する場合のkの値は、 $\int_0^5 \exp(-k x) dx = 0.9 \int_0^\infty \exp(-k x) dx$ より、 $k=0.46 \text{ (cm}^{-1}\text{)}$ となる。よって、単位面積当たり汚染量がS (kBq/m²)のとき、地表面付近の土壌中濃度A (Bq/g)は、 $A \rho \int_0^\infty \exp(-0.46 x) dx = S/10 \text{ (Bq/cm}^2\text{)}$ となり、これより $A=0.46S/10 \rho$ が得られる。土壌のみかけ比重 $\rho=1.5$ 程度とすると、 $A=0.03S$ となる。よって、空間線量がD (μSv/h)のとき、地表面付近のCs-134の濃度は $0.03 \times 130D=3.9D \text{ (Bq/g)}$ 、Cs-137の濃度は $0.03 \times 150D=4.5D \text{ (Bq/g)}$ となる。

内部被曝量の算定で重要とされる核種に、Sr-90がある。しかし、Sr-90はβ線しか出さないため、Ge半導体検出器などで測定できず、Sr-90の汚染状況に関するデータは現段階では極めて不十分である。いくつかの測定例では放射能比 $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr} = 10\sim30$ 程度の値が得られているようであるので、ここでは安全側として、Sr-90の土壌中濃度をCs-137の1/10として評価を試みる。つまり、地表面付近のSr-90の濃度を $0.45D \text{ (Bq/g)}$ と仮定する。

4 内部被曝量の推定

4.1 子供の経口摂取内部被曝量

いくつかの公園土壌で、粒径 2mm 以下と、105 μm 以下の土壌の土壌中 Pb 濃度を比較すると、粒径 105 μm 以下では、通常の土壌中濃度(粒径 2mm 以下)の数倍の濃度となる場合も多いことが報告されている²⁾。また、同時に公園の地面を手のひらでこすって、よく払った後の手に付着している土壌粒子は、9 割以上が粒径 100 μm 以下の粒子であったことも報告されている。これらから、子供らが遊びの中などで土壌を摂取する場合、粒径 100 μm 以下の粒子で評価するべきと考え、経口摂取することとなる土壌の濃度として地表面土壌中濃度の 5 倍を仮定することとした。これは、土壌汚染対策法にはない考え方であるが、汚染源が明らかに表面沈着に限られるという今回の原発汚染事故の場合には、妥当な仮定であると考えられる。空間線量を D ($\mu\text{Sv/h}$) とすると、3.2 より地表面濃度は $\text{Cs-134}: 3.9D$ (Bq/g)、 $\text{Cs-137}: 4.5D$ (Bq/g)、 $\text{Sr-90}: 0.45D$ (Bq/g) であり、土壌粒子の摂取に関与するのは、100 μm 以下の粒子であると考え、この 5 倍の濃度の土壌粒子を、子供達は毎日 200mg 摂取することになることから、 Cs-134 の摂取量は $3.9D \times 5 \times 0.2 = 3.9D$ (Bq/day)、同様に $\text{Cs-137}: 4.5D$ (Bq/day)、 $\text{Sr-90}: 0.45D$ (Bq/day) である。これらから年間摂取量は、 $\text{Cs-134}: 1400D$ (Bq/year)、 $\text{Cs-137}: 1600D$ (Bq/year)、 $\text{Sr-90}: 160D$ (Bq/year) となる。

内部被曝量はこれらに表 1 に示す経口摂取での実効線量係数をかけて求まるので、内部被曝量は $\text{Cs-134}: 1.8 \times 10^{-3}D$ (mSv/year)、 $\text{Cs-137}: 1.5 \times 10^{-3}D$ (mSv/year)、 $\text{Sr-90}: 7.5 \times 10^{-3}D$ (mSv/year) となる。

よって、経口摂取内部被曝量の合計はこれらを足し合わせて、 $0.041D$ (mSv/year) と推定される。

4.2 子供の吸入摂取内部被曝量

4.1 と同様に、粒径 100 μm 以下の土壌粒子が吸入摂取に関与すると考えると、地表面濃度の 5 倍の濃度の土壌粒子が再飛散し、空気中濃度となる。空気中濃度を求めるには再飛散係数を用いる方法もあるが、ここでは空気中土壌粒子濃度として、PM2.5 の環境基準の 1 年平均値 ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) を用いて計算してみる。5 歳児の呼吸率として ICRP が提案した値 $8.7\text{m}^3/\text{day}$ を用いると、 Cs-134 の吸入摂取量は $3.9D \times 5 \times 15 \times 10^{-6} \times 8.7 = 0.0025D$ (Bq/day)、同様に、 $\text{Cs-137}: 0.0029D$ (Bq/day)、 $\text{Sr-90}: 0.00029D$ (Bq/day) である。4.1 と同様、年間吸入摂取量をそれぞれ求め、これらに表 1 に示す吸入摂取での実効線量係数をかけて、求めた吸入摂取内部被曝量の合計は $1.6 \times 10^{-5}D$ (mSv/year) 程度であると推定され、吸入摂取内部被曝量は経口摂取内部被曝量に比べ無視できる程度と推定される。

5 外部被曝量の推定

地上高 1m での空間線量を D ($\mu\text{Sv/h}$) とする。1 日にその土壌上で 8 時間、線量が 40% となる屋内に 16 時間いるとすると、被曝量は $8D + 0.4 \times 16D = 14.4D$ ($\mu\text{Sv/day}$) $= 5.3D$ (mSv/year) である。この計算式から現在の $3.8 \mu\text{Sv/h}$ という校庭の暫定基準値が導かれている。ただし、子供に対しては、空間線量の値として地上高 50cm での値を用いるべきとなっているが、本研究の計算では、地上高 50cm と 1m での空間線量の差については考慮していない。放射線源が地面に広く分布しているので、高度にともなう減衰は点線源の場合のように大きくないが、子供に対する外部被曝量をいくらか過少評価している可能性があることは考慮しておく必要がある。なお、奥村氏の解析³⁾では地上 1cm での空間線量測定値が地上 1m での測定値の 1.3 倍程度という結果を得ているので、高さの影響を無視していることによる誤差は 30% 程度以下と推定される。

6 内部被曝を考慮した空間線量の規制値と対応する範囲

以上より、地上高 1m での空間線量が D ($\mu\text{Sv/h}$) である汚染土壌では、外部被曝量は $5.3D$ (mSv/year)、内部被曝量は $0.041D$ (mSv/year) と推定される。土壌のみによる内部被曝量が $0.041D$ (mSv/year) だとすると、土壌汚染対策法などでの考え方を援用すると、飲料水や食品も含めた被曝量の目安として、 $0.41D$ (mSv/year) という推定値が得られる。よって、総被曝量は $5.7D$ (mSv/year) と推定され、内部被曝量を考慮すると、現在の暫定基準は約 1 割弱厳しく設定すべきということになる。

総被曝量を $5.7D$ (mSv/year) として、年間 20mSv、5mSv (放射線管理区域となる基準)、1mSv に相当する領域、お

よび放射線障害防止法で定められた放射性同位元素の定義上、表層土壌の放射能量が放射性同位元素となる領域 (Cs-134 と Cs-137 の合計が 10Bq/g を超える領域。Sr-90 は放射性同位元素となる濃度が 100Bq/g なので、Sr-90 の濃度を考えると、その影響は無視できる。) を求めると、20mSv/year : $3.5 \mu\text{Sv/h}$ 、5mSv/year : $0.88 \mu\text{Sv/h}$ 、1mSv/year : $0.18 \mu\text{Sv/h}$ である。表層土壌の放射能量が放射性同位元素となる領域は、 $3.9D+4.5D=10$ より、 $1.2 \mu\text{Sv/h}$ である。土壌がクリアランスレベル (Cs-134 と Cs-137 の合計が 1Bq/g、または 0.1Bq/g) を満たす領域は、 $0.12 \mu\text{Sv/h}$ 、または $0.012 \mu\text{Sv/h}$ となる。よって、理想的には土壌上での空間線量は $0.1\sim0.2 \mu\text{Sv/h}$ くらいまでは、下げたいと考えられる。

総被曝量 20mSv/year、5mSv/year、1mSv/year に対応する空間線量 $3.5 \mu\text{Sv/h}$ 、 $0.88 \mu\text{Sv/h}$ 、 $0.18 \mu\text{Sv/h}$ に対応する領域を図示すると、おおよそ図2のようになる。ただし、図2は様々な空間線量の報告値を単にプロットしただけであり、Cs-134 と Cs-137 以外の γ 線の影響を除く操作も、測定日の違いによる補正も行わず、測定高度も統一できていないデータであるため、単なる目安に過ぎない。しかし、被曝量 1mSv/year に対応する領域が関東地方を含む非常に広い範囲に広がっており、今回の汚染の深刻さを示している。

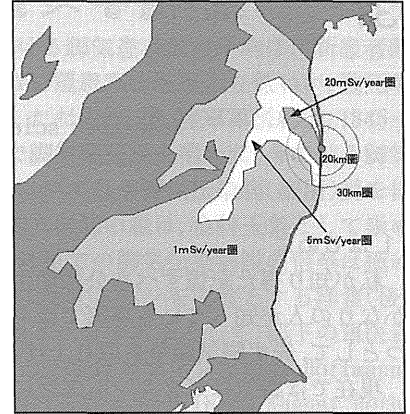


図2 各被曝量に対応することが懸念される領域
(参考文献4のデータを元に作成)

7. 結論

本研究では、福島原発事故により発生した放射性物質による土壤環境汚染のリスクレベルを評価するために、重金属汚染などを対象とした土壤汚染対策法の基準値設定で用いられているシナリオを用いて、空間線量と内部・外部被曝量との関係を求めた。その結果は以下のようにまとめられる。

- 1) 汚染後数ヶ月程度が経過し、Cs-134とCs-137以外が無視できるようになり、Cs-134とCs-137の減衰が無視できる場合、空間線量($\mu\text{Sv/h}$)から汚染濃度(kBq/m^2)を求めるには、Cs-134で約130倍、Cs-137で約150倍すれば良い。
- 2) 空間線量がD ($\mu\text{Sv/h}$) のとき、地表面付近の各核種の土壤中濃度はCs-134: $3.9D$ (Bq/g)、Cs-137: $4.5D$ (Bq/g)、Sr-90 : $0.45D$ (Bq/g) 程度であると推定される。
- 3) 子供の経口摂取内部被曝量は $0.041D$ (mSv/year) 程度と推定される。また、吸入摂取内部被曝量の合計は、 $1.6 \times 10^{-5}D$ (mSv/year) 程度であると推定され、吸入摂取による内部被曝量は経口摂取による内部被曝量に比べ無視できる程度と推定される。よって、地上からの直接被曝量は $5.3D$ (mSv/year) 程度となる。
- 4) 総被曝量20mSv/year、5mSv/year、1mSv/yearに対応する空間線量は $3.5 \mu\text{Sv/h}$ 、 $0.88 \mu\text{Sv/h}$ 、 $0.18 \mu\text{Sv/h}$ 程度と推定され、被曝量1mSv/yearに対応する領域は広く関東地方にまで及んでいる。

参考文献

- 1) 今中哲二, 遠藤暁, 菅井益郎, 小澤祥司: 福島原発事故にともなう飯館村の放射能汚染調査報告, 岩波『科学』, 2011.5.
- 2) 米田 稔, 辻 貴史, 坂内 修, 森澤眞輔: 子供を対象にした公園土壌直接摂取のリスク評価における粒径の影響, 環境工学研究論文集, 第42巻, pp.29-38, 2005
- 3) 奥村暁: <http://d.hatena.ne.jp/oxon/20110411/1302473302>, 2011.6
- 4) <http://www.nnistar.com/gmap/fukushima.html>, 2011.6

キーワード: 福島原発、土壌、放射能汚染、内部被曝、外部被曝

Key Words: Fukushima atomic power plant, Soil, Radioactive pollution, Internal exposure, External exposure