

論文 放射性セシウムによって生ずるコンクリート外壁の汚染とその評価に関する基礎研究

別府 克俊*1・丸山 一平*2・半井 健一郎*3・山田 一夫*4

要旨: 本研究では、福島第一原子力発電所の事故によって放出された放射性セシウム、特に ^{137}Cs に対して、コンクリート表面に沈着して内部へ移動する挙動を差分法によってモデル化した。さらに、 ^{137}Cs の内部への移動にともなう生ずるガンマ線量の変化について、測定点の線量当量率を積算する形の点減衰核法による予測手法を構築した。この手法ではガンマ線遮蔽における減衰定数に、モンテカルロ法によってあらかじめコンクリートの調合、含水率依存性を考慮した値を設定した。本手法を用い、JAEA の除染事業における線量当量率測定結果と比較したところ、一部の分配係数において、オーダーが一致していることが確認できた。

キーワード: 放射性セシウム, PHITS, モンテカルロ法, 差分法, 水分移動, 移流拡散, 分配係数

1. はじめに

2011年3月11日に起きた東北地方太平洋沖地震に伴う福島第一原子力発電所の事故により、福島県を中心とした東日本全体に及ぶ広域な放射性物質汚染が生じた。この汚染は原発事故に伴い放出された放射性物質がエアロゾルなどの形で広域に移流拡散し、降雨に伴って地上に降下沈着することによって生じた。現在、環境放射能のほとんどを占めている放射性セシウムは、雨に溶けてイオンの形で降り注がれ、土壌や家屋に吸着したと考えられている¹⁾。

家屋に対しては、これまでの高圧洗浄、及び、ブラッシングや拭き取りなどの除染作業の結果より、鉄筋コンクリート造、木造にかかわらず、屋外の除染による線量当量率低減効果とほぼ同比率で、屋内の線量当量率も低減されることが分かっている²⁾。これは屋外の除染効果が屋内における線量当量率の低減に寄与していることを意味している。そのため、屋内の線量当量率低減を目指すためには、周辺屋外の除染が重要と考えられている。

雨水に含まれるセシウムなどの放射性物質は、乾いた多孔質材料に対しては、吸水現象と並行して汚染を生じさせる。このことは各種の建築物・土木構造物に利用されている多孔性無機建材において、非平衡状態で放射性物質が浸透・吸着・収着していることを意味する。放射性物質の浸透状況を理解することは、放射能除染技術の選定に有効であるとともに、軽度に汚染した材料を有する建物の継続利用の判断にあたり、線量当量率の将来予測を行う上でも重要であるため、社会的にも喫緊の課題となっている。

本論文では最初に、 ^{137}Cs から放出されるガンマ線のコンクリートの遮蔽効果における骨材、含水率による寄

与を評価し、代表的な減衰係数を得た。次にその結果を踏まえて、離散化した節点での線源量を基に、コンクリート外壁上の任意の空間における非散乱線量評価手法を構築した。また別途、差分法によって ^{137}Cs の分布を移流拡散問題についてモデル化し、 ^{137}Cs の移動と外部線量を予測する手法を構築した。

2. ガンマ線のコンクリートによる遮蔽効果

2.1 PHITS での解析

(1) 使用プログラム

解析は日本原子力研究開発機構が開発した、モンテカルロ法を基にしたプログラム、PHITS を用いて行った³⁾。これは広いエネルギーを持つ各種の放射線を扱える粒子・重イオン輸送計算コードであり、モンテカルロ法により、積分型放射粒子密度方程式について以下の4ステップを経て解を得る。

- ①線源条件により線源粒子を発生させる。
- ②輸送カーネルにより、次の衝突点の粒子の空間位置を計算する。(ここでカーネルとは核のことをいう。)
- ③衝突カーネルにより、衝突後の粒子のエネルギーと飛行方向を計算する。
- ④得られた物理量(放射線粒子密度)から放射線束を算出する。

PHITS では、任意の体系中における陽子・中性子・重イオン・電子・光子などの挙動を、核反応モデル及びデータをを用いて模擬的に表わすことができる。

(2) ^{137}Cs の定義

PHITS において、 ^{137}Cs は $^{137\text{m}}\text{Ba}$ と永続平衡(放射平衡)の関係にあり、 $^{137\text{m}}\text{Ba}$ からの核異性体転移によって強いガンマ線を放出するメカニズムはプログラムに組み込ま

*1 名古屋大学 工学部社会環境工学科 (学生会員)

*2 名古屋大学 大学院環境学研究所 准教授・博士(工学)(正会員)

*3 広島大学 大学院工学研究院 准教授・博士(工学)(正会員)

*4 (独)国立環境研究所 試験循環・廃棄物研究センター フェロー・博士(工学)(正会員)

れていない。そのため、線源に ^{137}Cs を用いることはできない。以上の理由から、本研究ではインプットファイルにおいて、1Bq の ^{137}Cs が崩壊した場合、85.1%の割合で 0.662MeV のガンマ線を放出するという事を利用して、1秒間に0.851個のガンマ線を0.662MeVの強さで放出する線源を置くことで、 ^{137}Cs を模擬した。

(3) 使用材料及び調合

解析対象のコンクリートは、セメントペースト、骨材の量を一定とした、表-1 に示す調合とした。セメントペーストの含水率は文献⁴⁾を参考にしており、本解析では、平衡湿度 RH11%, RH60%, RH100%状態の含水率に対して検討を行った。また、骨材については石灰岩と砂岩を比較しており、実際は石灰岩や砂岩には様々な組成が含まれているが、骨材の種類による影響を明確にする目的で、石灰岩を CaCO_3 、砂岩を SiO_2 のみの組成とした。PHITS では物質を定義する際に、解析に用いる物質の質量から算出した元素の質量を、物質を生成する元素全てに与えるので、表-2 の組成表には 1cm^3 のコンクリート中のセメント、骨材、水における元素の重量(g/cm^3)を表記した。また水分の量はそれぞれの含水率によって算出した。このコンクリートを用いて、鉄筋コンクリート住宅の壁厚を想定した厚さ 20cm の面方向に対する無限壁をモデル化し、厚さ方向 1mm ごとに線量当量率を求め、減衰定数を評価した。

2.2 減衰定数を用いた線量当量率評価

(1) 評価方法

物質が均質な単一物質の場合では、一度も衝突することなく測定点に直線で到達する非衝突線において、光子の数は式(1)の指数関数形式で示される。

$$I = I_0 \exp(-\mu t) \quad (1)$$

ここで、 I_0 : 入口での光子の数、 μ : 減衰係数(1/mm)、 t : 距離(mm)である。

任意の節点での線量当量率評価には、他の節点での ^{137}Cs による線量当量率も測定される。他の節点での初期線量当量率を、減衰係数を用いて距離に応じて減衰させ、任意の節点での初期線量当量率に加えて評価を行うことで、部材断面内の任意点の線量当量率評価が可能となる。この線量当量率評価の概念図を図-1 に示す。なお、本研究では PHITS で求めた 1Bq の ^{137}Cs の初期線量当量率を用いて、任意の節点での初期線量当量率を、Bq 数に応じて求めた。この手法は、点減衰核法として知られる。今回の解析では非衝突線のみを評価したものを扱っているが、非衝突線だけでなく、直線ではないが物質内で散乱を繰り返すことによって測定点に到達する、散乱線を加えて評価することによって、人体への影響を考慮した線量当量率評価が可能となる。しかしこの評価は、非衝突線のみ結果の線量当量率に、ビルドアップ係数⁵⁾を乗じることで容易に求めることができるため、今回の解

表-1 解析対象のコンクリート 1cm^3 の調合表

セメントの種類	水セメント比(%)	空気量(%)	単位量(g/cm^3)			
			水	セメント	細骨材	粗骨材
早強	50	4.0	0.183	0.366	0.799	0.995

表-2 1cm^3 のコンクリート中の構成材料化学組成

	単位量(g/cm^3)					
	セメント	骨材		水		
		砂岩	石灰岩	RH11%	RH60%	RH100%
Si	4.06×10^{-2}	8.39×10^{-1}	0	0	0	0
Al	3.58×10^{-3}	0	0	0	0	0
Fe	5.38×10^{-3}	0	0	0	0	0
Ca	1.67×10^{-1}	0	7.18×10^{-1}	0	0	0
Mg	2.34×10^{-3}	0	0	0	0	0
S	3.55×10^{-3}	0	0	0	0	0
Na	7.66×10^{-4}	0	0	0	0	0
K	1.84×10^{-3}	0	0	0	0	0
C	0	0	2.15×10^{-1}	0	0	0
Cl	2.95×10^{-5}	0	0	0	0	0
O	1.41×10^{-1}	9.55×10^{-1}	8.60×10^{-1}	9.10×10^{-2}	1.18×10^{-1}	1.71×10^{-1}
H	0	0	0	1.15×10^{-2}	1.49×10^{-2}	2.15×10^{-2}
合計	3.66×10^{-1}	1.79	1.79	1.02×10^{-1}	1.33×10^{-1}	1.92×10^{-1}

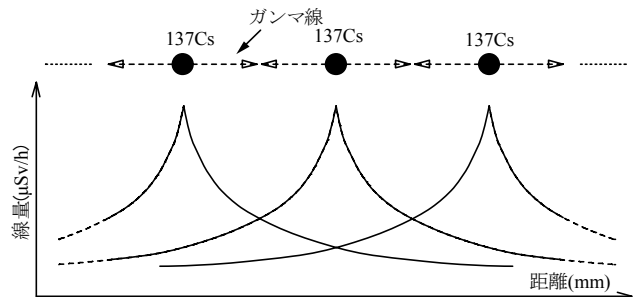


図-1 線量当量率評価の概略図

析では散乱線を含めた解析は省略した。

(2) PHITS との比較

本来、放射性物質に対する線量当量率評価は、モンテカルロ法においては統計誤差が充分小さくなるまで解析を行う必要がある。本検討では、この統計誤差が有意に小さくなった時の結果と、2.2(1)項で示した手法を相互比較することで、妥当性の検証を行う。

解析条件は 1Bq の ^{137}Cs を 2.5mm 間隔に並べ、図-1 に示す形の分布を仮定し、隣接する両節点に対して単色ビームを放出するものとした。

2.3 PHITS 解析結果

(1) 使用材料及び含水状態の影響

図-2 は骨材と含水率による影響を、壁の厚さ方向に対して検討したグラフであり、横軸の 0mm と 200mm は壁面を、横軸の距離 0-200mm は壁の内部を表している。この図より骨材の種類による線量当量率の減衰の変化はほとんど生じていないことが分かる。また、含水率が大きいコンクリートの方が質量が大きくなるため、わずかなではあるが、含水率の高いコンクリートの方が遮蔽能力に優れていることが分かった。

(2) 減衰定数と空気中の減衰

非衝突線のみを評価したときの線量当量率は、減衰定数を用いた指数関数で表される。PHITSでの解析にて得た、1Bqの¹³⁷Csから放出されたガンマ線の、平衡湿度RH11%、RH60%、RH100%の各コンクリートに対する挙動の結果を指数関数曲線に近似して、それぞれの減衰定数を定めた。また、別途、空気中のγ線の挙動を評価し、コンクリートと同様の方法で空気中の減衰定数を定めた。各減衰定数を表-3に示す。減衰定数は、コンクリートに関しては、平衡湿度RH11%、RH60%、RH100%状態において、小数点以下3桁の範囲では全て同じ値になった。またこの表より、空気中でも線量当量率の減衰は生じるが、その減衰の程度はコンクリートと比較して極端に小さいことが分かる。

2.4 PHITSと差分法の解析結果の比較

図-3は、2.2(2)項にて示した同条件下での、PHITSと点減衰核法での解析結果をそれぞれグラフにしたものであり、横軸は図-2と同様に、壁の厚さ方向を表している。また、点減衰核法での線量当量率評価に必要な減衰定数には、表-3の値を用いた。この図より初期線量当量率と減衰定数を用いた解析には妥当性があり、モンテカルロ計算を毎回行う必要がないことが確認できた。

3. 差分法による¹³⁷Csの移動シミュレーション

本解析では拡散、移流、水分移動を同時に考え、各支配方程式を差分法における陽解法で解き、コンクリート中の¹³⁷Csの移動シミュレーションを行う。また、本解析のコンクリートは2章での解析に用いたもので、初期の平衡湿度はRH60%とした。

3.1 差分法

差分法では微分方程式に現れる導関数を、離散点における関数値の線形結合で近似する。図-4のように離散点があるとき、1階微分及び2階微分は

$$\frac{df}{dx} \sim \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (2)$$

$$\frac{d^2f}{dx^2} \sim \frac{f(x+h) - 2f(x) + f(x-h)}{h^2} \quad (3)$$

と近似できる。ここで記号 \sim は近似を表す。また差分法では領域内の任意の点における解を求めるのではなく、図-5に示したように、領域を差分格子と呼ばれる格子状に分割した上で、格子点(格子線の交点)における微分方程式の近似解を求めることになる。図-5ではt軸は時間を、x軸は各節点の座標を表していて、図-6のように次ステップでの解を求めていく⁹⁾。

3.2 ¹³⁷Csの移流拡散

(1) 移流

流体中の物質としては、例えば水蒸気、微量ガス、エアロゾル、塩分など、物理量としては運動量、エネルギー、

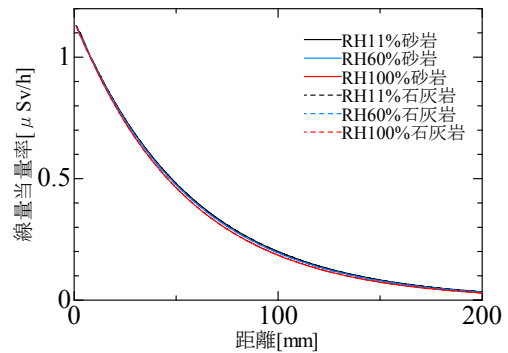


図-2 骨材別、含水率別の非衝突線のみ評価した線量当量率の減衰曲線

表-3 コンクリート上と空気における非衝突線の減衰定数

	減衰定数(1/mm)	
コンクリート	RH11%	1.8×10^{-2}
	RH60%	1.8×10^{-2}
	RH100%	1.8×10^{-2}
空気		1.0×10^{-5}

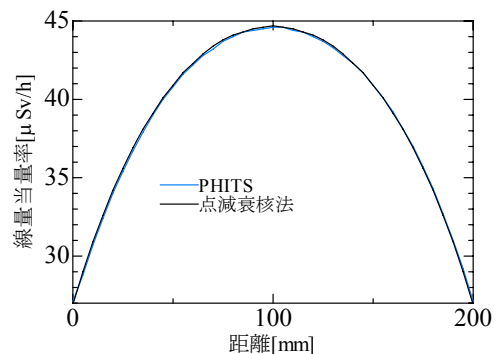


図-3 PHITSと点減衰核法の各位置での線量当量率

過度、顕熱などがあり、物理量 $u(t,x)$ が速度 v で移流することを表す移流方程式は、一次元の場合、以下の式(4)のように示される。

$$\frac{\partial u(t,x)}{\partial t} + v \frac{\partial u(t,x)}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

(2) 拡散

物理量 $u(t,x)$ の拡散方程式は拡散係数 D を用いて、一次元の場合、以下の式(5)のように示される。

$$\frac{\partial u(t,x)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial x^2} \quad (5)$$

(3) ¹³⁷Csの移流拡散方程式

前項で説明した移流方程式、拡散方程式より、本解析での水分移動に伴う¹³⁷Csの移流拡散方程式は、以下の式(6)のように示される。

$$\frac{\partial u(t,x)}{\partial t} = D_{cs} \frac{\partial^2 u(t,x)}{\partial x^2} - J_w \frac{\partial u(t,x)}{\partial x} \quad (6)$$

ここで、 J_w : 水分の流速($g/m^2/s$)、 D_{cs} : Csの水中の拡散係数。水分流速 J_w については水分移動の解析で求めた値

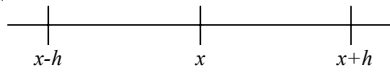


図-4 差分法における離散点の概要

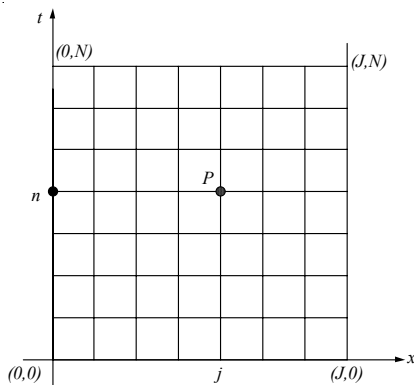


図-5 領域を差分格子で分割した図

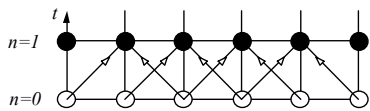


図-6 解の時間発展

を用い、拡散係数 D_{cs} については文献⁷⁾を参考した。

3.3 水分移動

今回の解析では水分移動について、丸山らが提案している化学ポテンシャルを駆動力とした以下の式(7)に従って解析を行う⁸⁾。

$$J_w = -D(w) \frac{\partial w}{\partial x} = -K(w) \frac{\partial \mu}{\partial x} \quad (7)$$

ここに、 $D(w)$: 水分伝導率(m^2/s)、 $K(w)$: 水分伝導率($m^2/s \cdot g/m^3 \cdot m^2/N$)、 μ : 水分の化学ポテンシャル(J/mol)、 w : 含水率(g/m^3)。また、式(7)に基づく水分の輸送方程式は式(8)のようになる。

$$\frac{\partial w}{\partial \mu} \frac{\partial \mu}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} K(w) \frac{\partial \mu}{\partial x} + \dot{W} \quad (8)$$

ここでは、 \dot{W} : 水分の消費・生成を表す項、であるが今回の解析では十分に水和が進行した状態のコンクリートを想定しているので、解析ではこの項をゼロとした。また境界条件については丸山らが提案した、熱伝達係数の考え方を踏襲した式(9)を用いた。

$$J_{env} = A \cdot K(w) \frac{(\mu - \mu_{env})}{d_{env}} \quad (9)$$

ここに、 J_{env} : 境界面からの水分逸散量(g/s)、 A : 境界面の面積(m^2)、 μ_{env} : 外部空気中の水分の化学ポテンシャル(J/mol)、 d_{env} : 境界面と空気との遷移区間を仮想的にセメント硬化体の長さで換算した値で、丸山らが解析に用いた値と同様に今回の解析では3mmと設定した。

差分法による解析では節点間隔を5mmとし、東日本大震災が起こった2011年3月11日から福島市で初めて

表-4 ^{137}Cs のコンクリートに対する分配係数¹⁰⁾

(ml/g)	最大値	報告の多い代表値	最小値
分配係数	3.7×10^3	1.0×10	0.0

除染事業および線量測定が行われた2011年10月18日までの206日間を対象とし、時間ステップを0.1時間間隔とした。水分の移動には自由水のみを考えており、水の供給は境界面での平衡湿度によって与えた。このときの湿度は、晴天時、曇天時については気象庁によるデータを用いており、雨天時については飽水状態を仮定した。温度については、本来は日射や外気温変動の影響なども評価の必要があると考えられるが、今回の解析ではその影響を無視した上で、全ての節点において温度を20°C一定とした。

3.4 ^{137}Cs の境界条件

境界条件での ^{137}Cs の入力値には、文科省が発表している放射線モニタリング情報の値を用いた⁹⁾。この値は各自治体が雨やちりなどの降下物を、毎日24時間、降水採取装置により採取し、ゲルマニウム半導体核種分析装置にて ^{137}Cs を分析し、文科省に報告した値である。この採取された ^{137}Cs は、降雨時に雨と共にコンクリートへ移流すると考え、晴天時には ^{137}Cs は表面に付着はするが、内部には浸透しないものとした。ゆえに本解析では、降雨時のみ、表面に付着した ^{137}Cs が内部へ移流し、3.5節に後述する分配係数に応じて、液相と固相に ^{137}Cs が分配されることとした。

3.5 ^{137}Cs の分配係数

分配係数とは溶液中の放射性物質濃度 c (mg/ml)と試料に残る放射性物質濃度 q (mg/g)とが平衡状態にある場合の両者の比のことをいい、以下の式(10)で示される。

$$K_d = \frac{q}{c} \quad (10)$$

ここで、 K_d : 分配係数(ml/g)。

Csはコンクリート中の主として骨材部分に吸着するため、Csの分配係数は骨材の種類によって変化する。また、打込み後数年が経過し、炭酸化が進行した場合や、地下水との接触によりアルカリ成分が溶脱したコンクリートでは、Csと競合する陽イオンの溶出量が低いため、Csの分配係数は大きくなる¹⁰⁾。Csの分配係数に関する報告は非常に多く、今回の解析ではそれらの報告の中で最大の値、最小値、報告の多い中間値に対して解析を行い、異なる分配係数を用いたときのコンクリート中の ^{137}Cs の移動を検討することとした。解析で用いた分配係数を表-4に示す。なお、実際には平衡状態になるまでにある程度の時間がかかると考えられるが、本研究では瞬時平衡が成り立つと考え、コンクリートの境界条件に ^{137}Cs が付着すると同時に、 ^{137}Cs は液相と固相に分配されるものとして解析を行った。

3.6 ^{137}Cs の線量当量率評価

本解析では2章で示したように、PHITSで解析した1Bqの ^{137}Cs の、コンクリートに対する初期線量当量率と減衰定数を用いた点減衰核法と、差分法にて移動問題として解いた ^{137}Cs の分布予測を連成し、壁面での線量当量率評価を行った。線量評価点については、3.7(2)項に後述する。各節点の線量当量率は、それぞれの ^{137}Cs の濃度からBq数进行评估し、そのBq数に1Bqの ^{137}Cs による初期線量当量率を乗じることによって決定した。g(グラム)からBq(ベクレル)への変換には以下の式(11)を用いた。

$$A = \frac{0.693 W}{T_{1/2} M} \times 6.02 \times 10^{23} \quad (11)$$

ここで、 A ：放射能(Bq)， $T_{1/2}$ ：半減期(s)， M ：放射性物質の質量数(g/mol)， W ：放射性物質の質量(g)

3.7 差分法による解析結果

図-7は外部から供給される水分について、断面内の含水率分布について評価した結果である。図-8, 9, 10のグラフは各分配係数を仮定した場合のコンクリート壁上の非散乱ガンマ線の線量当量率変化挙動であり、同時に、206日後の各分配係数での ^{137}Cs の分布を示した。これらの分布図では、左側が壁の屋外側表面を、右側が屋内側表面を示しており、横軸は壁の厚さ方向を表す。

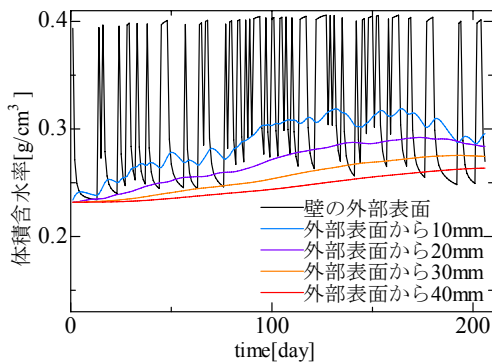


図-7 コンクリート内の体積含水率の経時変化

(1) 分配係数の影響

図-7における水分移動では、時間が経過するほど外部からの水分がコンクリート内部に流入していくことが分かる。図-8は分配係数が0、つまり ^{137}Cs が全て液相に存在するときの線量当量率変化のグラフであり、屋外側の壁面表面だけではなく、壁内全体に渡って ^{137}Cs が分布していることが分かる。一方、図-9,10の解析では ^{137}Cs がコンクリート内部で液相と固相に分配されるため、分布図のように屋外側の境界面付近で固相の ^{137}Cs 濃度が大きくなり、それに伴い、屋内側へ流入する液相の ^{137}Cs 量が減少した形となっている。そのため屋内側の ^{137}Cs の濃度は小さくなり、線量当量率についても分配係数0の解析に比べて小さな値を示している。

以上のことから、分配係数が小さいコンクリートほど ^{137}Cs が内部に流入するため、屋内側の線量当量率は大きくなりやすいという定性的傾向が確認された。

(2) 除染事業での結果との比較

本解析では、各節点での ^{137}Cs の濃度 $[\text{g}/\text{mm}^3]$ から線量を $[(\mu\text{Sv}/\text{h})/\text{mm}^3]$ の単位で評価する。また、除染事業による道路やコンクリート等の表面線量当量率の測定では、通称コリメートと呼ばれる、地表面に置いた鉛ブロック(20cm×10cm×5cm)で四方を取り囲んだ中の、高さ1cm

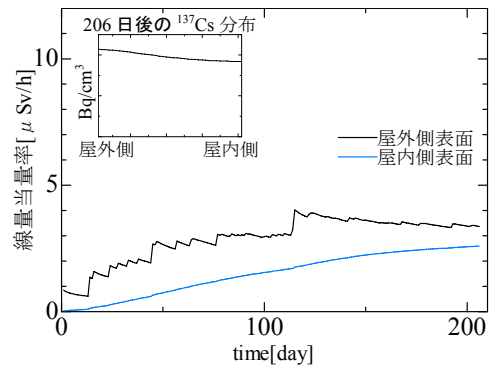


図-8 分配係数0のときの、 ^{137}Cs による線量変化と震災から206日後の ^{137}Cs の壁内部の分布

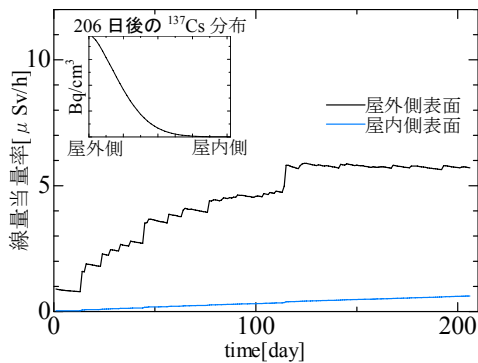


図-9 分配係数10のときの、 ^{137}Cs による線量変化と震災から206日後の ^{137}Cs の壁内部の分布

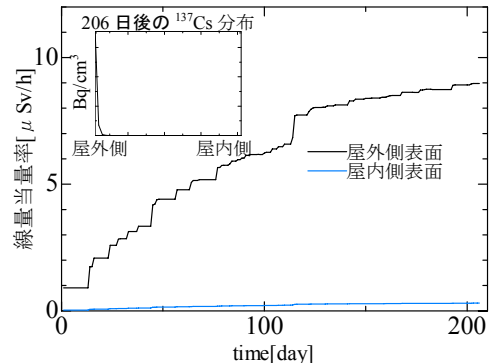


図-10 分配係数3700のときの、 ^{137}Cs による線量変化と震災から206日後の ^{137}Cs の壁内部の分布

表-5 解析による空間線量

分配係数(m/g)	線量当量率($\mu\text{Sv/h}$)	
	壁の屋外側表面	壁の屋内側表面
0	2.8	2.6
10	5.7	0.6
3700	9.0	0.3

表-6 除染事業が測定した実際の空間線量

測定箇所	除染前の線量当量率($\mu\text{Sv/h}$)	
屋根	瓦等	1.4
	雨どい	3.8
室内	1階	0.7
	2階	0.8

を測定する方法が基本となっている¹¹⁾。ゆえに本研究では、コリメート法でつくられる空間(10cm×10cm×1cm)を想定し、解析結果の $[(\mu\text{Sv/h})/\text{mm}^3]$ をもとに、その空間に相当する線量当量率を求め、その線量当量率をコンクリート壁面の線量当量率と定めることとした。なお、2章の解析で求めた空気上の減衰定数が、コンクリートに比べて3桁も小さく、計算に影響を及ぼさないことから、壁面上の値で線量当量率評価を実施した。

表-5 にコンクリート壁の屋外側表面と屋内側表面の、解析による空間線量を示した。分配係数 10 と 3700 の結果は、表-6 の除染事業で測定した室内側の値とも、オーダーは一致していることが確認できた。

本解析はさまざまな仮定値の上になりたっているが、それぞれの仮定を検証することで、線量評価と内部のCs分布評価、降雨環境等を考慮した今後のCsの再溶出リスク評価などに用いることができると期待される。

4. 結論

本研究ではPHITSを用い、コンクリートの遮蔽能力に対する骨材、含水率による影響を示した。また、点減衰核法による線量評価手法と差分法による¹³⁷Csの移流拡散モデルを連成させ、非散乱ガンマ線の線量変化予測手法の構築を行った。

- 1)コンクリートの骨材に同じ重量の石灰岩または砂岩を用いても遮蔽能力はほぼ同じであったため、遮蔽能力に対する骨材の元素組成の影響は少ないと考えられる。また含水率が大きいコンクリートの方が多少、遮蔽能力が優れていることが確認された。
- 2)分配係数による線量変化の影響は大きく、分配係数が大きいほど固相に吸着する¹³⁷Csは増え、コンクリート内部へ侵入する液相の¹³⁷Csが少なくなるため、内部の線量が外部表面に比べて小さくなることを確認された。
- 3)正しい室内線量を評価するためには、ホットスポットなどからの線量評価が重要であり、具体的な案を考えることが今後の課題である。

謝辞

本論文における解析において、PHITSの開発者の一人である日本原子力研究開発機構の橋本慎太郎様から、丁寧かつ熱心なご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 資源循環・廃棄物研究センター：放射性物質の挙動からみた適正な廃棄物処理処分(技術資料 第二版)、(独)国立環境研究所、2012.3、http://www.nies.go.jp/shinsai/techrepo_r2_120326s.pdf、(参照 2012.11)
- 2) (独)日本原子力研究開発機構：警戒区域、計画的非難区域等における除染モデル実証事業 報告の概要、環境省、2012.4、<http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryoy2012/siryoy12/siryoy1-2.pdf>、(参照 2012.11)
- 3) K. Niita, N. Matsuda, Y. Iwamoto, H. Iwase, T. Sato, H. Nakashima, Y. Sakamoto and L. Sihver, PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System, Version 2.23, JAEA-Data/Code 2010-022, 2010
- 4) 丸山一平, 岸直哉：セメント硬化体の収縮理論, 日本建築学会構造系論文集, Vol.74, No.642, pp.1395-1403, 2009.8
- 5) 財団法人原子力安全技術センター：放射線施設の遮蔽計算実務マニュアル, 双文社, 2007
- 6) 桑原邦郎, 河村哲也：流体計算と差分法, 朝倉書店, 2005
- 7) (独)国立環境研究所：北港処分地(夢洲1区)における広域処理災害廃棄物焼却灰埋立時の放射性セシウムの挙動に関する評価報告, 大阪市, 2012.6, <http://www.city.osaka.lg.jp/hodoshiryoy/kankyo/0000170082.html>、(参照 2012.12)
- 8) 丸山一平, 五十嵐豪, 岸直哉：セメント硬化体中の水分移動に関する基礎研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.668, pp.1737-1744, 2011.10
- 9) 原子力対策支援本部：定時降下物のモニタリング, 文部科学省, 2012.1, http://radioactivity.mext.go.jp/old/ja/monitoring_by_prefecture_fallout/2011/10/index.html、(参照 2012.12)
- 10) 加藤大生, 嶺達也, 三原守弘, 大井貴夫, 本田明：セメント系材料に対する核種の収着データベースの整備, 核燃料サイクル開発機構技術資料 JNC TN8400 2001-029, 2002
- 11) (独)日本原子力研究開発機構：モニタリングに関する手引き, 福島技術本部, 2012.8, http://www.jaea.go.jp/fukushima/kankyoanzen/d-model_report/3.2、(参照 2012.12)