760. 砂層中におけるCs-137の移動

移動に及ぼす土壤微細粒子の影響

大貫敏彦*, 和達嘉樹*

(1982年 9月20日 受理)

(1983年 2月15日 再受理)

Migration of Cesium-137 through Sandy Soil Layer Effect of Fine Silt on Migration

By Toshihiko OHNUKI and Yoshiki WADACHI

The migration of ^{137}Cs through sandy soil layer was studied with consideration of the migration of fine silt by column method. It was found that a portion of fine silt migrated through the soil layer accompanying with ^{137}Cs . The mathematical migration model of ^{137}Cs involved the migration of fine silt through such soil layer was presented. This model gave a good accordance between calculated concentration distribution curve in sandy soil layer and effluent curve and observed those. So, this model seems to be advanced one for evaluating migration of ^{137}Cs in sandy soil layer with silt.

KEYWORDS: radioactive waste, underground disposal, cesium 137, fine silt, radionuclide migration, mathematical model, environmental safety assessment, sandy soil layer

I. 緒 言

我が国の方針⁽¹⁾によれば、原子力発電所から生じる低レベル放射性廃棄物の処分は、海洋処分と陸地処分によって行われる。低レベル放射性廃棄物を陸地処分する場合の安全性を評価するため、廃棄物パッケージ、処分施設等の人工バリアーおよび地層からなる自然バリアーのバリアー効果について、これまでに幾つかの研究がなされている^{(2)~(9)}。しかしながら、自然バリアー中における放射性核種の挙動については、放射性核種の化学形および地層の複雑性などの要因により、まだ明らかとなっていない部分が多い。

井上ら⁽³⁾は、地層中における放射性核種の移動が、地下水による輸送および拡散ならびに放射性核種と土壌との吸着反応により支配されるとして、吸着反応がヘンリー型で行われる場合、放射性核種の移動と水の移動との間に線形性が成立し、水の移動を求めることから、放射性核種の移動が予測できることを示してい

る。さらに森沢ら⁽⁴⁾は、帯水層中における ^{90}Sr の移動を理論的に解析した結果と、模擬帯水層を用いた実験により得られた結果がほぼ一致することを報告している。また福井らは、SrとCsの土壌中における吸着反応式について検討を行い⁽⁵⁾、反応式が非線形で与えられる場合の拡散輸送方程式について1次元の解を得ている⁽⁶⁾。

武部ら⁽⁷⁾は、土壤微細粒子を除いた砂を用いて ^{85}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co について通気状態砂層中移動実験を行なった結果、 ^{137}Cs はそのほとんどが砂層表面付近に吸着して移動し難いことを報告している。筒井ら⁽⁸⁾は、 ^{137}Cs が地層中に存在する土壤微細粒子に特異的に吸着し、吸着された ^{137}Cs は容易に脱着し難いことを報告している。一方、著者ら⁽⁹⁾は、土壤微細粒子を除いていない砂を用いて ^{85}Sr 、 ^{137}Cs 、 ^{60}Co について帯水状態砂層中

* 日本原子力研究所環境安全研究部 (Div. of Environmental Safety Res., Japan At. Energy Res. Inst.)

移動実験を行なった結果、 ^{137}Cs は砂層中をかなり移動することを報告している。

これらのことから、地層中において土壤微細粒子が何らかの原因*により移動した場合には、それに吸着している ^{137}Cs は土壤微細粒子とともに移動するものと考えられる。したがって、 ^{137}Cs の地層中移動に及ぼす土壤微細粒子の影響について検討することは、今後の放射性核種の地中移動モデルを検討する場合においても重要である。

本報は、 ^{137}Cs の地中移動に及ぼす土壤微細粒子の影響と、 ^{137}Cs の砂層中における移動モデルについて検討した結果である。

II. 理 論

1. 従来の移動モデル

放射性核種の地層中における移動を支配する方程式は、(1)式で与えられる^③。

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(C + \frac{\rho}{\theta} q \right) = \nabla \cdot D (\nabla C) - \nabla \cdot (VC) \quad (1)$$

ここに、 C : 間隙水中における放射性核種の濃度 (Ci/cm³)

q : 固相中における放射性核種の濃度 (Ci/g)

θ : 水分率 (cm³/cm³)

ρ : かさ密度 (g/cm³)

D : 拡散係数 (cm²/min)

V : 水の移動速度 (cm/min)

間隙水中における放射性核種と固相中におけるそれとの間にヘンリー型吸着反応式(2)が成り立つ場合には、

$$q = K_d C \quad (2)$$

ここで、 K_d : 分配係数

(1)式は(3)式となる。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{K_f} [\nabla \cdot D (\nabla C) - \nabla \cdot (VC)] \quad (3)$$

ここに、 K_f は Retardation factor と呼ばれる係数で、次式で表わされる。

$$K_f = 1 + \frac{\rho}{\theta} K_d \quad (4)$$

したがって、放射性核種の地層中移動は、(3)式を用いてそれぞれの係数の値を代入することから得ることができる。

2. 土壤微細粒子の移動を考慮した移動モデル

地層中においては放射性核種が陽イオンとして存在する場合には、(3)式によりその移動を予測すること

ができるが、放射性核種が土壤微細粒子に吸着して土壤微細粒子とともに移動する場合には、土壤微細粒子の移動モデルを用いて予測する必要がある。

土壤微細粒子は、地層中(通気層中、帯水層中)において間隙水の移動に伴う輸送および拡散によって移動すると考えられる。また、地層中において土壤微細粒子が移動する際、土壤微細粒子が地層中でトラップされて移動できなくなることが考えられる。したがって、地層中における土壤微細粒子の移動を表わす支配方程式は、輸送拡散方程式(5)で与えられる。

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + \frac{1}{\theta} \cdot \frac{\partial C_s'}{\partial t} = \nabla \cdot D_s (\nabla C_s) - \nabla \cdot (V_s C) \quad (5)$$

ここに、 C_s : 移動することができる土壤微細粒子の濃度 (1/cm³)

C_s' : トラップされる土壤微細粒子の濃度 (1/cm³)

D_s : 土壤微細粒子の拡散係数 (cm²/min)

V_s : 土壤微細粒子の移動速度 (cm/min)

土壤微細粒子がトラップされる現象の起こりうる確率が、地層中において一様であることを仮定し、 C_s と C_s' との関係を次式により表わすことから

$$C_s' = K_s C_s \quad (6)$$

地層中における土壤微細粒子の移動は、(7)式により表わすことができる。

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{1}{R_s} [\nabla \cdot D_s (\nabla C_s) - \nabla \cdot (V_s C_s)] \quad (7)$$

ここに、 $R_s = 1 + \frac{1}{\theta} K_s$

土壤微細粒子の拡散係数 D_s は、Ahlstrom ら^④により(8)式のように表わされ、

$$D_s = D_m |V_s| + D_d \quad (8)$$

$D_m |V_s| \gg D_d$ が成立する範囲では、(8)式は次式となる。

$$D_s = D_m |V_s| \quad (9)$$

ここで、 D_m : 標準拡散係数

D_d : 分子拡散係数

地層中において、土壤微細粒子の移動速度 V_s は水流速と同じであることを仮定し、(9)式を(7)式に代入することから(10)式が得られる。

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \frac{1}{R_s} [\nabla \cdot (D_m |V|) (\nabla C_s) - \nabla \cdot (V C_s)] \quad (10)$$

土壤微細粒子は、その大きさによりトラップされる確率が異なると考えられる。ある粒径における土壤微

* 処分施設を建設した場合に攪乱された土壤中の土壤微細粒子は移動しやすくなると考えられる。

細粒子のトラップによる遅れを R_{st} とすると、 $1/R_s$ は次式のように表わされる。

$$1/R_s = \sum_{i=1}^n P_{st} \frac{1}{R_{st}} \quad (11)$$

ここに、 P_{st} : ある粒径に存在する土壤微細粒子の確率

したがって、(10)、(11)式より、土壤微細粒子の地層中移動を表わす次式が得られる。

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{R_{st}} \{ \nabla \cdot (D_m | \nabla |) (\nabla C_{st}) - \nabla \cdot (VC_{st}) \} \right] \quad (12)$$

このことから、土壤微細粒子の移動を考慮した放射性核種の移動モデルは、陽イオンとして吸着—脱着を繰り返しながら移動する部分((3)式)と、土壤微細粒子とともに移動する部分((12)式)との重ね合せにより、次式のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_s}{\partial t} = & P_1 \left[\frac{1}{K_f} \{ \nabla \cdot (DVC) - \nabla \cdot (VC) \} \right] \\ & + P_2 \left[\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_{st}} \{ \nabla \cdot ((D_m | \nabla |) \nabla C_{st}) - \nabla \cdot (VC_{st}) \} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

ここに、 P_1, P_2 はそれぞれ陽イオンとして移動する部分および土壤微細粒子とともに移動する部分の存在率である。 $(P_1 + P_2 = 1)$

III. 実験方法

1. 砂試料および砂層の形成

実験に用いた砂は、日本原子力研究所東海研究所敷地内で採取した海岸砂である。この海岸砂の粒子密度は 2.63 g/cm^3 であり、酢酸アンモニウム法により測定したイオン交換容量は 2.29 meq/100 g である。標準ふるいにより測定した海岸砂の粒度分布をTable 1に示す。

Table 1 Distribution of grain size of sandy soil measured by standard sieve

Grain size (mm)	Weight percent (%)
1.68~0.85	7.4
0.85~0.40	37.3
0.40~0.25	36.6
0.25~0.11	14.8
0.11~0.075	0.3
0.075 under	3.6

採取した海岸砂を乾燥器により 105°C で 4 h 乾燥した後、標準ふるいを用いて粒径が 1.68 mm 以上の砂礫等を取り除き調整砂を得た。一方、調整砂を水洗いす

ることによって土壤微細粒子を取り除き微細粒子除去砂を得た。

実験に用いたカラムは、塩化ビニール製で内径 5 cm 、高さ 25 cm である。砂層の形成は、調整砂については空隙率が 40% となるように秤量してカラム内に充填して行い、微細粒子除去砂については調整砂と同重量をカラム内に同じ砂層深になるように充填して行なった。砂層深はそれぞれ 15 cm とした。また、カラム内砂層下部には水はけをよくするため、ガラス玉を敷いた(Fig. 1 参照)。

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2. 放射性水溶液の調整および流下実験

実験に用いた ^{137}Cs は日本アイソトープ協会より購入したもので、その化学形は $^{137}\text{CsCl}$ である。放射性水溶液の調整は、 $1.0 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/ml}$ の濃度となるように脱イオン水で希釈したものである。この際、 ^{137}Cs は特に担体を加えずに用いた。

放射性水溶液の流下実験は、マイクロチューブポンプにより、砂層表面中心部に 20 ml/min の給水速度で全量が 4 l に達するまで行なった(Fig. 1 参照)。なお、この場合の水流速は、高速中性子透過法⁽¹¹⁾により測定した結果、 5 cm/min であった。

^{137}Cs の砂層中における移動を測定するため、カラム下部より流出液を 250 ml 間隔で採取した。さらに、放射性水溶液の流下終了後に、砂を砂層深 1 cm 間隔に採取した。採取した水試料および砂試料の放射能を、ORTEC 社製の Ge(Li) 半導体波高分析装置により測定した。

3. 土壤微細粒子の移動実験

砂層中において土壤微細粒子とともに移動する ^{137}Cs の移動を検討するために、微細粒子除去砂 50 g を、直径 1.9 cm の小カラムに充填して砂層を形成した。この砂層深は 9 cm であった。

実験では、 ^{137}Cs ($2.00 \mu\text{Ci}$) を吸着させた土壤微細粒

子(0.16 g*)を脱イオン水(200 ml)に混合した溶液を、マイクロチューブポンプにより 3.2 ml/min の供給速度で砂層表面に流下させて行なった。土壤微細粒子とともに移動して流出する ^{137}Cs を測定するため、カラム下部より流出液を 10 ml 間隔で採取した。採取した水試料の放射能を ORTEC 社製の Ge(Li) 半導体波高分析装置により測定した。

IV. 結果および考察

Fig. 2 は、調整砂層および微細粒子除去砂層からの ^{137}Cs の流出曲線である。同図より、 ^{137}Cs は調整砂層から流出するが、微細粒子除去砂層からはほとんど流出しないことがわかる。

Fig. 2 Effluent curves of ^{137}Cs through sandy soil layer

一方、Fig. 3 は、放射性水溶液の流下を終了した後の調整砂層および微細粒子除去砂層における ^{137}Cs

Fig. 3 Concentration distributions of ^{137}Cs in sandy soil layer

の濃度分布である。同図より、砂層中の ^{137}Cs の濃度分布を比較すると、砂層表面層では調整砂層中の ^{137}Cs の濃度が微細粒子除去砂層中のそれよりも大きい。しかし、砂層表面層より深さ 3 cm までは、微細粒子除去砂層中における ^{137}Cs の濃度が調整砂層中のそれよりも大きい。一方、砂層が 3 cm よりも深いところでは、調整砂層中の ^{137}Cs の濃度が微細粒子除去砂層中のそれよりも大きいことが認められる。

流出液が 1,000 ml を超えたところにおいて採取した流出液の放射能濃度を測定した後、流出液を H. Reeve Angel & Co. Inc. 製の No. 934-AH グラスフィルタにより汙過した。その結果、汙液の放射能濃度は汙過前のそれに比べて 1/20 に減少した。さらに、グラスフィルタに捕集された土壤微細粒子を走査型電子顕微鏡 (S.E.M.) を用いて観察した。その結果を Photo. 1 に示すが、これによればグラスフィルタに捕集された粒子は、直径が数 μm であることが判明した。また、本実験での土壤微細粒子の粒度分布を、粒子アナライザ (東洋インキ製ルーセックス 450) を用いて検鏡法により測定した結果を Table 2 に示す。Table 2 より、土壤微細粒子は直径 10 μm 以下のものが 80% 近い粒子数を占めていることが明らかである。

Table 3 には、微細粒子除去砂、調整砂および土壤

Photo. 1 Scanning electron micrograph of fine silt flowed out

* これは、砂層深さ 1 cm 中に存在する、粒径が 74 μm 以下の土壤微細粒子の重量に等しい。

Table 2 Distribution of grain size of fine silt measured by particle analyzer

Grain size (μm)	Relative number of particle (%)	Grain size (μm)	Relative number of particle (%)
1.0 under	16.6	30.0~34.0	0.8
1.0~ 2.0	26.6	34.0~38.0	0.9
2.0~ 4.0	18.4	38.0~42.0	0.6
4.0~ 6.0	9.6	42.0~46.0	0.6
6.0~ 8.0	6.6	46.0~50.0	0.6
8.0~10.0	5.0	50.0~54.0	0.4
10.0~14.0	6.8	54.0~58.0	0.4
14.0~18.0	4.1	58.0~62.0	0.2
18.0~22.0	3.2	62.0~66.0	0.3
22.0~26.0	2.0	66.0~70.0	0.3
26.0~30.0	1.4	70.0~74.0	0.2

微細粒子に対して、バッチ法により得た ^{137}Cs の分配係数を掲げる。同表より、それぞれの土壌における ^{137}Cs の分配係数の間には、

土壌微細粒子>調整砂>微細粒子除去砂

の関係があり、 ^{137}Cs の分配係数は土壌微細粒子の場合には、微細粒子除去砂および調整砂に比べて約1桁大きいことがわかる。

Table 3 Distribution coefficient of ^{137}Cs for conditioned sandy soil with or without fine silt and fine silt itself

Soil	Conditioned soil (without silt)	Conditioned soil (with silt)	Fine silt
$K_d(\text{ml/g})$	184	318	3,021

以上のことから、 ^{137}Cs の砂層中における移動には、陽イオンとして存在して吸着-脱着反応を繰り返しながら移動する部分と、土壌微細粒子に吸着して土壌微細粒子とともに移動する部分とが存在するものと判断される。

Fig. 4 は、土壌微細粒子とともに移動する ^{137}Cs の移動をさらに検討するために、小カラム (1.9cm ϕ) を用いた土壌微細粒子の移動実験により得られた、 ^{137}Cs で標識された土壌微細粒子の流出曲線である。図中、流出濃度は、砂層に流下した原液*の ^{137}Cs の放射能濃度により規格化した相対濃度である。**Fig. 4** より、流出量の増加とともに土壌微細粒子の相対濃度が増加すること、さらに流出の初期において相対濃度が急激に増加し、その後流出量の増加とともに相対濃度が

ゆるやかに増加することが認められる。このことから、土壌微細粒子の移動には、速く移動する部分と、それよりも遅く移動する部分が存在すると考えられる。

Fig. 4 Effluent curves of fine silt obtained by experiment with small soil column

Fig. 4 より、速く移動する土壌微細粒子の水の移動に対する遅延度 R_e および土壌微細粒子の標準拡散係数 D_m を求めた。遅延度 R_e は、流出曲線の相対濃度が $1/2$ になるまでの経過時間 t_{silt} と、水(水流速 2.8cm/min)が砂層中を通過するのに要する時間 t_{water} とにより、

$$R_e = t_{\text{silt}} / t_{\text{water}}$$

と表わせる。このようにして得られた遅延度 R_e は 1.5 であった。標準拡散係数 D_m は輸送拡散方程式の 1 次元解析解((14)式)を用いて、流出曲線の初期部分のフィッティングにより求められる。

$$\frac{C}{C_0} = \frac{1}{2} \left\{ e^{x^2/D_m} \operatorname{erfc} \left(\frac{x + vt/R_e}{2\sqrt{D_m vt/R_e}} \right) + \operatorname{erfc} \left(\frac{x - vt/R_e}{2\sqrt{D_m vt/R_e}} \right) \right\} \quad (14)$$

ここに、 C_0 : 流下した原液の濃度
得られた結果は $D_m = 0.7 \text{ cm}$ であった。

ここで、第 II 章で述べた移動モデルを用いて、 ^{137}Cs の砂層中濃度分布および流出曲線を求め、実験により得られたそれらと比較した。ただし、(13)式を解くために、砂層中における砂粒子に対して、以下の仮定を行なった。

- (1) 砂層中に存在するすべての砂粒子は間隙水により移動できるが、粒径の大きなものは移動速度が

* 土壌微細粒子の一部がカラムに送られる間にチューブ中に沈降するため、カラム砂層に流下する液の濃度とした。

非常に遅いと考えられるので、本実験条件下では移動しないものとする。また移動できる砂粒子(土壤微細粒子)のうち、 ^{137}Cs の砂層中移動に寄与するものは砂層表面層に存在するものとする。

- (2) ^{137}Cs の砂層中移動に対しては、砂層表面層において ^{137}Cs の砂粒子への吸着は平衡に達していると考えられるため⁽⁴⁾、砂粒子に吸着した ^{137}Cs の濃度 q_0 は、 ^{137}Cs の調整砂に対する分配係数 K_{a0s} を用いて $q_0 = K_{a0s} C_0$ で表わされる。ここに、 C_0 は流下した放射性水溶液の原液濃度である。さらに、 q_0 は土壤微細粒子以外の砂粒子に吸着する濃度 q_{01} と、土壤微細粒子に吸着する濃度 q_{02} とに分けることができる。すなわち、

$$q_0 = q_{01} + q_{02} \\ = (P_{01}K_{a\text{sand}} + P_{02}K_{a\text{slit}})C_0 \quad (15)$$

ここに、 P_{01}, P_{02} : それぞれ土壤微細粒子以外の砂粒子、土壤微細粒子の存在確率

$K_{a\text{sand}}, K_{a\text{slit}}$: それぞれ土壤微細粒子以外の砂粒子(微細粒子除去砂)、土壤微細粒子に対する ^{137}Cs の分配係数

以上の仮定から、下記のような初期条件および境界条件により、(3),(13)式を鉛直方向1次元について解き、 ^{137}Cs の砂層中分布および流出曲線を求めて実験結果と比較する。

〔初期条件〕

^{137}Cs 水溶液が浸透するまでは、 ^{137}Cs および ^{137}Cs を伴った土壤微細粒子の移動は起こらないため、初期条件は $t < t_0$, $x \geq 0$ において

$$C_s = 0, \quad C = 0$$

〔境界条件〕

^{137}Cs 水溶液が浸透すると、砂層表面層においては、流入する ^{137}Cs 水溶液濃度と砂粒子に吸着する濃度との関係は平衡に達する⁽⁴⁾ので、それ以後土壤微細粒子に吸着する ^{137}Cs はない。したがって、前記の仮定(2)より、砂層表面層における境界条件は、 $x=0$ において、土壤微細粒子に吸着する ^{137}Cs については、

$$t = t_0, \quad q_{0i} = P_i K_{a\text{slit}} \cdot C_0$$

ここに、 i : 土壤微細粒子の粒径区分 ($i \neq 1$)
土壤微細粒子以外の砂粒子に吸着する ^{137}Cs については、

$$t \geq t_0, \quad q_{01} = P_1 K_{a\text{sand}} C_0$$

ここに、 t_0 : ^{137}Cs の流下開始時刻

を与えた。(4),(13)式の解法は、差分法(Clank-Nicolson, S.O.R.法)により行なった。差分法におけるステップ幅は、距離について0.25cm、時間について0.25minとしている。

得られた ^{137}Cs の砂層中分布および流出曲線を、実験により得られた結果とともに、Fig. 5 および 6 にそれぞれ示す。計算では、 ^{137}Cs の標準拡散係数 $D_m^{137\text{Cs}}$ には森沢らが同一海岸砂について得た0.92cm⁽⁴⁾、土壤微細粒子の標準拡散係数 D_m には本実験で得られた0.70cm、土壤微細粒子を除いた砂粒子、調整砂および

Fig. 5 Concentration distribution curves of ^{137}Cs in sandy soil layer by mathematical model and by experiment

Fig. 6 Effluent curves of ^{137}Cs by mathematical model and by experiment

土壌微細粒子に対する分配係数 K_{dsand} , $K_{dcon.}$, K_{dsilt} にそれぞれバッチ法により得た 184, 318, 3,021 ml/g, 水流速 v には高速中性子透過法により求めた 5.0 cm/min を用いている。土壌微細粒子の遅延度を示す R_{st} の値は、本実験で得られた速く移動する部分についての 1.5 を粒径が 0~1.0 μm の部分に用い*, その他の部分については、 R_{st} が土壌微細粒子の粒径の 2 乗(断面積)に比例するとして得た。 P_i については、Table 1 に示された粒径が $\leq 75 \mu\text{m}$ となる土壌微細粒子の存在確率 P_{02} と、Table 2 より求めた粒度分布曲線から得た存在確率との積によって表わした。Table 4 に P_i および R_{st} の値を示す。

Table 4 Parameters used to calculation of migration of fine silt by mathematical model

Grain size (μm)	P_i ($\times 10^{-3}$)	R_{st}	Grain size (μm)	P_i ($\times 10^{-3}$)	R_{st}
1.0 under	6.0	1.5	9.0~10.00	0.9	541.50
1.0 ~ 1.25	2.3	7.6	10.0~11.00	0.8	661.50
1.25 ~ 1.50	2.3	11.34	11.0~12.00	0.6	793.50
1.50 ~ 1.75	2.3	15.84	12.0~13.00	0.6	937.50
1.75 ~ 2.00	2.3	21.09	13.0~14.00	0.5	1,093.50
2.00 ~ 2.25	1.6	27.09	14.0~15.00	0.4	1,261.50
2.25 ~ 2.50	1.1	33.84	15.0~16.00	0.4	1,441.50
2.5 ~ 3.00	1.6	45.37	16.0~17.00	0.3	1,633.50
3.0 ~ 3.50	1.4	63.37	17.0~18.00	0.3	1,837.50
3.5 ~ 4.00	1.1	84.37	18.0~19.00	0.3	2,053.50
4.0 ~ 4.50	1.0	108.37	19.0~20.00	0.3	2,281.50
4.5 ~ 5.00	0.9	135.37	20.0~22.00	0.4	2,646.00
5.0 ~ 5.50	0.8	165.37	22.0~26.00	0.7	3,456.00
5.5 ~ 6.00	0.8	198.37	26.0~30.00	0.5	4,696.00
6.0 ~ 7.00	1.3	253.50	30.0~34.00	0.3	6,144.00
7.0 ~ 8.00	1.1	337.50	34.0~38.00	0.3	7,776.00
8.0 ~ 9.00	0.9	433.50	38.0~42.00	0.3	9,600.00

Fig. 5 に示したように、 ^{137}Cs の砂層中移動を従来の移動モデルにより予測した場合には、砂層表面より数 cm の距離で濃度が急激に減少するのに比べて、土壌微細粒子の移動を考慮したモデルにより予測した場合には、砂層深 5 cm より現れるゆるやかな減少をよく表わしていることがわかる。さらに、Fig. 6 に示したように、流出曲線については、従来の移動モデルにより予測した場合にはほとんど流出しないという結果 ($10^{-20} \mu\text{Ci/ml}$ 以下) に比べ、土壌微細粒子の移動を考慮したモデルにより予測した場合には比較的よい一致を示していることがわかる。しかしながら、流出曲線

の初期の部分については多少の振動が見られる。これは、 R_{st} の基準値 1.5 を粒径 0~1 μm の部分に用いたために生じた、土壌微細粒子の粒径区分の不連続が原因であると考えられる。

さらに、武部らが本実験に使用した土壌と同様の、土壌微細粒子を除いていない海岸砂を用いて 30 cm ϕ カラムにより ^{137}Cs 水溶液 ($1.0 \times 10^{-8} \mu\text{Ci/ml}$; 80 l) の流下実験で得られた砂層中濃度分布⁽¹²⁾ と、本モデルにより予測したそれとを比較した。その結果を Fig. 7 に示す。ここで、濃度分布は砂層の中心部における 1 次元の濃度分布である。計算では、水流速 v には 0.5 cm/min を用いている。図より、本モデルにより予測した砂層中濃度分布と、実験により得られたそれとの間により一致が見られる。

Fig. 7 Concentration distribution curves of ^{137}Cs in sandy soil layer (middle size) by mathematical model and by experiment

以上のことから、 ^{137}Cs の砂層中移動を予測する場合には、 ^{137}Cs 自身のイオン交換反応による移動だけではなく、土壌微細粒子とともに移動する部分が存在すれば、それらを考慮した本移動モデルが、従来の移動モデルよりも有効であると考えられる。

* Fig. 4 における原液濃度は流下している ^{137}Cs 溶液の濃度であり、土壌微細粒子の一部は途中に残るので、定量的な取扱いが困難なため上述したように定めた。

V. 結 言

^{137}Cs の地中移動に及ぼす土壤微細粒子の影響と、 ^{137}Cs の砂層中における移動モデルとについて検討した。その結果、 ^{137}Cs の砂層中移動には土壤微細粒子の移動が影響することが明らかとなった。一方、土壤微細粒子の影響を考慮した ^{137}Cs の移動モデルを提案した。本実験により得られた ^{137}Cs の砂層中分布および流出曲線と、従来の移動モデルおよび本移動モデルにより得られたそれらとを比較した結果、本モデルにより従来のモデルでは表わすことができなかった ^{137}Cs の砂層中濃度分布における深部のゆるやかな減少と、速く流出する部分とをよく表わすことが可能となった。したがって、本モデルは ^{137}Cs の砂層中移動を評価する改善された一方法であると考えられる。

終りに、本研究を行うにあたって実験に協力して下さった東京大学工学部 鷲尾方一博士に感謝の意を表します。また、本報をまとめるにあたって、貴重なご

意見を頂いた日本原子力研究所 環境安全研究部 今井和彦部長に感謝の意を表します。さらに、走査型電子顕微鏡を使用するにあたって協力して下さいった当研究所 実用燃料試験室 天野英俊研究員ならびに燃料工学部 菊地正彦研究員に感謝の意を表します。

— 参 考 文 献 —

- (1) 原子力委員会月報, 21[10], 7 (1976).
- (2) 例えば, 寺島 泰: 土木学会論文報告集, No.209, 51 (1973).
- (3) INOUE, Y., KAUFMAN, W.J.: *Health Phys.*, 9, 705 (1963).
- (4) 森沢真輔, 井上頼輝, 馬原保典: 原子力誌, 20[2], 133 (1978).
- (5) 福井正美, 桂山幸典: 土木学会論文報告集, 254, 37 (1976).
- (6) 福井正美: 保健物理, 16, 111 (1981).
- (7) 武部慎一, 和達嘉樹: *JAERI-M-8044*, (1979).
- (8) 筒井天尊, 西牧研社: 土木学会論文集, 200, 25 (1972).
- (9) 大貫敏彦, 山本忠利, 鷲尾方一, 和達嘉樹: 原子力学会昭57年会要旨集, F10, (1982).
- (10) AHLSTROM, S.W., et al.: *BNWL-1717*, (1974).
- (11) 大貫敏彦, 山本忠利: 応用物理, 52[3], 268 (1982).
- (12) 武部慎一, 山本忠利, 和達嘉樹: 原子力学会昭57年会要旨集, F38, (1982).

文部省学術用語集(第3版)

原子力工学編

A 5 判, 318p (1978), 本会発行。

定価1,700円(会員特価1,530円)・千300円

ご希望の方は学会事務局へ。

全国大学原子力(核)工学教官名簿

(「原子力教育研究」特別専門委員会編)

1982年9月発行, 好評発売中

大学原子力(核)工学教官助手以上429名(1982年6月1日現在)の名簿で, 個人別の「主な研究題目」が記載してあります。(今回は昭和48年11月発行)

限定版で残部僅少, ご希望の方は事務局へ。

会員 500円(千240円), B 5 判, 42頁(タイポフ)

○原研RI・原子炉研修所○ 研修生募集

○第2回放射線防護専門課程

目 的 原子力発電所等で放射線管理を実施するための知識・技術を習得させる。

期 間 8月22日(月)～9月30日(金)

受講料 150,000円(定員 40名), 締切 7月20日(水)

申込先 (千319-11)茨城県東海村

原研RI・原子炉研修所(Tel. 02928-2-5667)

○第143回専門課程 RIの生物学への利用コース

内 容 生物学, 医学, 薬学, 農学などの研究者, 技術者を対象とするもので, RIの利用に必要な一般知識と基礎技術, 特に非密封RIの取扱技術と安全管理を, 実習を通して短期間に習得させる。

期 間 10月11日(火)～26日(水)

受講料 60,000円(定員 16名), 締切 9月3日(土)

○第144回専門課程 放射線化学コース(大阪研開催)

目 的 放射線化学の応用に関連した研究者, 技術者を対象として, 放射線化学の基礎から電子工業, 環境保全等への応用までを講義と実習の両面から習得させる。本年度は, 放射線利用に重点を置いたコース。

期 間 10月19日(水)～27日(木)

受講料 45,000円(定員 16名), 締切 9月24日(土)

○第189回基礎課程

目 的 RIの利用を目指す研究者, 技術者を対象とし, RIの一般知識と安全取扱いおよび利用のための基礎技術を実習を通して習得させる。

期 間 10月24日(月)～11月17日(木)

受講料 65,000円(定員 32名), 締切 9月17日(土)

申込先 (千113)東京都文京区本駒込2-28-49

原研RI・原子炉研修所(Tel. 03-944-4311～3)