

日本原子力研究開発機構機関リポジトリ  
Japan Atomic Energy Agency Institutional Repository

Title	放射性セシウム汚染土壌からの消化器系吸収率について
Author(s)	高原省五, 池上麻衣子, 米田稔, 近藤均, 石崎梓, 島田洋子
Citation	第 21 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集(CD-ROM), 2015, p.505-510.
Text Version	Publisher
URL	<a href="http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/search/servlet/search?5050155">http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/search/servlet/search?5050155</a>
Right	©Authors

## (S5-21) 放射性セシウム汚染土壌からの消化器系吸収率について

○高原省五<sup>1,2</sup>・池上麻衣子<sup>2</sup>・米田稔<sup>2</sup>・近藤均<sup>2</sup>・石崎梓<sup>1</sup>・島田洋子<sup>2</sup><sup>1</sup>日本原子力研究開発機構・<sup>2</sup>京都大学

## 1. 諸言

福島第一原子力発電所 (1F) 事故後の汚染地域では、日常生活を通じて放射線を被ばくする状況となっている。住民の被ばく線量は、汚染地域の被ばく管理において不可欠な情報の一つであり、経口摂取による内部被ばくは中長期的に関心の高い被ばく経路の一つである。この経路からの被ばくには、飲食物等に付着・含有されている放射性物質のほかに、汚染土壌の直接摂取による寄与も考えられる。特に、屋外において子供が遊ぶ場合など、不注意によって土壌を摂取することが考えられることから、住民の安心感を醸成するためにもこのような被ばく経路も含めて、網羅的に情報を提供することが重要となる。土壌の直接摂取による被ばく線量は、土壌の摂取量及び摂取頻度に加えて、摂取された放射性物質のうち消化器系を通じて血液循環に到達する割合、すなわち、Bioavailability を明らかにする必要がある。重金属等の Bioavailability は動物実験を通じて得られるものの、実験が困難なのでその情報は限られている。そこで、近年では、*in-vitro* 実験によって評価できる Bioaccessibility が Bioavailability に代わって用いられている (Ruby et al., 1999)<sup>1)</sup>。Bioaccessibility は、*in-vitro* 実験において「消化器系で抽出された金属量」/「土壌中の金属量」で定義され、動物実験による Bioavailability との比較から妥当性の検証が進められてきた。これまでに複数の *in-vitro* 実験手法を用いて多くの研究結果が報告されている (Oomen et al., 2002; Wragg and Cave, 2003)<sup>2,3)</sup>。しかし放射性セシウム汚染土壌に関する Bioaccessibility はこれまでに報告されておらず、また、Bioaccessibility は土壌の性質に依存するので、1F 事故後の汚染地域における土壌摂取の被ばく線量を評価するためには、現地の土壌による Bioaccessibility の評価研究が不可欠である (Calabrese, 2011)<sup>4)</sup>。

そこで本研究では、1F 事故の影響を受けた現地の土壌を用いて Bioaccessibility を評価するために、*in-vitro* 実験の一つである生理学的抽出実験 (PBET: Physiologically Based Extraction Test) を実施する (Ruby et al., 1996; Cave)<sup>5)</sup>。PBET は人体の胃や腸を模擬して抽出を行う実験であり、他の *in-vitro* 実験と比べて Bioavailability と関連の良い Bioaccessibility を評価できる方法として知られている (Wragg and Cave, 2003)<sup>3)</sup>。しかしその実験には長時間を要するうえに作業が複雑であり、特に放射性物質を扱った実験の際には放射性廃棄物も多くなることから、より簡便に Bioaccessibility を評価する方法が必要となる。そこで、比較的簡便かつ広く利用されている方法として、我が国の土壌含有量基準に係る測定方法である 1N HCl 抽出法 (環境省, 2003)<sup>6)</sup> を実施して、PBET による Bioaccessibility との比較をもとに、1N HCl による抽出結果を健康影響評価に利用できるか否か検討する。また、PBET による Bioaccessibility を用いて土壌の直接摂取による被ばく線量を評価する。

## 2. 実験概要

## 2.1 試料

福島県伊達市霊山こども村内の未除染地点において、1F 事故から約 3 年半経過した 2014 年 9 月に土壌試料を採取した。表面土壌をおよそ 1–5 cm の深さで採取した。採取した土壌は U8 容器に入れて保管した。採取土壌の重さを測定した後に、45°C で 24 時間乾燥させて乾土試料として再度重さを測定した。なお、24 時間時点で十分に乾燥していない試料は追加の乾燥時間を設けた。

乾土試料を 100 µm のふるいで 6 時間振とうして 100 µm 未満の土壌試料を得た。これは、手に付着した土壌中重金属への曝露に関して、100 µm 未満の土壌が支配的であると報告されているためである (Ikegami et al., 2014)<sup>7)</sup>。本研究でもこの報告をもとに 100 µm 未満の土壌を対象として抽出実験及び線量評価を実施することにした。乾土試料及び 100 µm ふるい後の試料重量を表 1 に示す。ふるい掛けで得られた 100 µm 未満の土壌重量は、全量に対して 20% 前後であった。

## Bioaccessibility of Radioactive Cesium in Soils

Shogo Takahara<sup>1,2</sup>, Maiko Ikegami<sup>2</sup>, Minoru Yoneda<sup>2</sup>・Hitoshi Kondo<sup>2</sup>・Azusa Ishizaki<sup>1</sup>Yoko Shimada<sup>2</sup>・Yasuto Matsui<sup>2</sup> (<sup>1</sup>JAEA, <sup>2</sup>Kyoto University)連絡先: 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4 独立行政法人 日本原子力研究開発機構  
TEL 029-282-6139 FAX 029-282-6147 E-mail takahara.shogo@jaea.go.jp

表1 土壌サンプルの採取深さと重量

Sample No.	採取深さ(cm)	乾土重量 (g)	100 $\mu$ m 未満の乾土重量(g)
2-4-1	1	108	22.1
2-5-1	1	118	24.4
2-6-1	1	108	22.2
2-7-1	1	106	20.9
2-8-1	1	103	19.5
2-4-5	5	83.1	18.7

## 2.2 抽出実験

本研究では、環境省告示 19 号（環境省, 2003）<sup>6)</sup>に準ずる方法で 1N HCl 抽出を実施し、Ruby (1996)<sup>5)</sup>及び Cave (2003)<sup>8)</sup>の方法で PBET を実施した。また、<sup>137</sup>Cs の抽出量を測定する際には放射能測定を実施することから、測定の精度を高くするためにより多くの土壌試料を用いて測定することが望ましい。そこで、より多量の土壌を用いても抽出結果が変わらないか確認するために、上記の標準的な方法における固液比に加えてより高い固液比でも実験を行った。1N HCl 抽出実験及び PBET の詳細について、それぞれ以下に示す。

### (1) 1N HCl 抽出

1N HCl 抽出法は、環境省告示 19 号（環境省, 2003）<sup>6)</sup>に準ずる方法で行った。100  $\mu$ m 未満の土壌試料に対して固液比が 3%となるように 1N HCl を加えて、室温 (25°C) で 2 時間、200 rpm にて振とうした。その後 3000 rpm で 10 分間遠心分離して、上澄み液をシリンジフィルター (0.45  $\mu$ m) で濾過して測定試料を得た。また、固液比については、標準的な 3%に加えて 10%でも実験を行った。

### (2) PBET

Ruby (1996)<sup>5)</sup>及び Cave (2003)<sup>8)</sup>をもとに、胃及び小腸を模擬して PBET を行った。100  $\mu$ m 未満の土壌試料に対して固液比が 1%となるように人口胃液を加えた。人工胃液は、純水 1 L にペプシン 1.25 g、クエン酸水和物 0.5 g、リンゴ酸 0.5 g、乳酸 0.42 ml、酢酸 0.5 ml を加えて作成した。Ruby (1996) によると胃液の pH が低くなるほど Bioaccessibility は高くなると報告されているので、保守的な評価となるように胃液の pH を 1.3 (空腹時想定) に調整した。なお、pH 調整には 11.2N HCl を利用した。人工胃液を加えた試料を 37°C で 1 時間、100 rpm で振とうした。次に、小腸での消化を模擬するため、透析膜セルロースチューブに炭酸水素ナトリウムと脱イオン水を加えて pH を 7 に調整し、胆汁末 1.75 mg/mL とパンクレアチン 0.5 mg/mL を加えて 4 時間静置した。その後、3000 rpm で 10 分間遠心分離し、シリンジフィルター (0.45  $\mu$ m) で濾過して PBET 抽出液とした。また、固液比については、標準的な 1%に加えて 10%でも実験を行った。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 土壌の放射能測定の結果

採取土壌 1 kg あたりの放射能を表 2 に示す。放射能は、ORTEC 社製 HPGe 半導体検出器 GMX-30190 を用いて誤差が 3%以内となるようにして測定した。なお、測定結果は土壌採取日時 (2014 年 9 月 11 日) の値に補正した。減衰補正する際には、放射性崩壊のみを考慮した。100  $\mu$ m ふるい後の試料の放射能は、ふるい掛け前の試料の 2.6 $\pm$ 0.3 倍となった。土壌の直接摂取による被ばく評価においては、前述のように被ばくに寄与する粒径を決定するとともに、その粒径に応じて <sup>137</sup>Cs 濃度の濃縮効果を考慮しなければならない。土壌粒径と <sup>137</sup>Cs 濃度の関係については複数の先行研究 (Livens and Baxter (1988); He and Walling (1996); Spezzano (2005); Sakaguchi (2006); Sakaguchi (2014))<sup>9-13)</sup>において、粒径に対する反比例モデルやベキ関数モデルが報告されているものの、<sup>137</sup>Cs に関する一般的なモデルはこれまでに知られていない。一方で Sheppard (1995)<sup>14)</sup>は皮膚に付着した土壌の濃縮係数を先験的に評価する方法として、土壌中の Clay (<2  $\mu$ m) と Silt (2-50  $\mu$ m) の重量比に基づく評価式を提案している。この評価式を用いて計算すると濃縮係数は、校庭等の砂地に対して 5-10、その他の土壌に 2-3 となる (Sheppard, 1995)<sup>14)</sup>。本研究ではこれらの先行研究を参考にしつつ、<sup>137</sup>Cs の粒径による濃度を考慮するものとして、今回の実験で得られた平均値 2.6 を用いて線量を評価することにした。

### 3.2 抽出液中の放射能測定の結果と Bioaccessibility

1N HCl 及び PBET による抽出液の放射能測定の結果、並びにこれらの結果に基づく抽出率及び Bioaccessibility を表 3 に示す。1N HCl による抽出率は、環境省告示第 19 号<sup>6)</sup>に準ずる方法で 16%±3%、固液比を 10%にした抽出で 6.5%±1%となった。また、PBET による Bioaccessibility は、標準的な方法で 5.4%±1%、固液比を 10%とした方法で 0.93%±0.3%となった。固液比と Bioaccessibility との関係に関するヒ素を用いた PBET の結果では、固液比が高いと土壌の溶解が平衡に達することで、固液比が高くなると Bioaccessibility は高くなることが報告されている (Harmel et al., 1998)<sup>15)</sup>。本研究の結果でも 1N HCl による抽出率及び PBET による Bioaccessibility は固液比が高くなると低くなっており、固液比が高いと溶解が平衡に達することで抽出率及び Bioaccessibility を低く評価してしまうことが示唆された。放射性物質で汚染された土壌に対する抽出実験では、放射能測定に関する利便性から固液比を高くして、より多くの放射性物質が含まれている条件での測定が望まれる。しかし本研究の結果によると、固液比は、標準的な方法に準ずる条件に固定して実験する必要がある。

環境省告示第 19 号に準ずる方法で実施した 1N HCl による抽出率と標準的な PBET による Bioaccessibility の関係を図 1 に示す。1N HCl による抽出率は PBET による Bioaccessibility に対しておよそ 3 倍で非常に良い相関関係が見られた。坂内他 (2003)<sup>16)</sup>は複数の重金属に関して、1N HCl による抽出率と PBET による Bioaccessibility とを比較して、1N HCl による抽出率がいずれも~3 倍程度の範囲で Bioaccessibility と良い相関にあることを示している。本研究でもこれらの結果と整合性のある結果を得ることができた。これらのことから、1N HCl による抽出率を用いることで PBET による Bioaccessibility を用いた場合と比較して十分保守的に健康影響を評価できることが示唆された。今後、性質の異なる他の土壌に対してもこの関係が利用できるか否か、さらなる検討が必要である。

表 2 採取土壌及びふるい掛け試料中の <sup>137</sup>Cs 濃度

Sample No.	土壌中 <sup>137</sup> Cs 濃度 (Bq/kg) (乾土)	100 μm 未満の土壌中 <sup>137</sup> Cs 濃度 (Bq/kg) (乾土)	100 μm 未満の土壌中 <sup>137</sup> Cs 濃度に対する 土壌中 <sup>137</sup> Cs 濃度の比
2-4-1	51,800	156,000	3.0
2-5-1	71,600	181,000	2.5
2-6-1	67,300	174,000	2.6
2-7-1	57,300	155,000	2.7
2-8-1	37,400	98,600	2.6
2-4-5	32,500	66,700	2.1

注 1) 伊達市内の未除染地点 (2014 年 9 月 11 日の採取時点) において採取した土壌の測定結果、

注 2) <sup>137</sup>Cs 濃度は 2014 年 9 月 11 日時点で減衰補正した値。

表 3 1N HCl 及び PBET による抽出液の放射能測定の結果と Bioaccessibility

Sample No.	1N HCl			PBET		
	固液比 (g/mL)	抽出液中の <sup>137</sup> Cs 濃度 (Bq/50mL)	抽出率 <sup>(1)</sup>	固液比 (g/mL)	抽出液中の <sup>137</sup> Cs 濃度 (Bq/50mL)	Bioaccessibility (小腸)
2-4-1	3%	39	17%	1%	4.6	5.9%
2-5-1		48	18%		5.2	5.7%
2-6-1		46	18%		5.6	6.4%
2-7-1		41	18%		4.5	5.7%
2-8-1		21	14%		2.3	4.7%
2-4-5		11	11%		1.2	3.7%
2-4-1	10%	57	7.3%	10%	6.2	0.8%
2-5-1		67	7.4%		7.5	1.1%
2-6-1		58	6.6%		8.2	1.2%
2-7-1		55	7.0%		5.9	0.9%
2-8-1		29	5.9%		3.5	0.9%
2-4-5		15	4.6%		1.3	0.5%

<sup>(1)</sup> 1N HCl による抽出率は、「抽出前の土壌中 <sup>137</sup>Cs 濃度」に対する「抽出後の抽出液中 <sup>137</sup>Cs 濃度」の割合で定義する

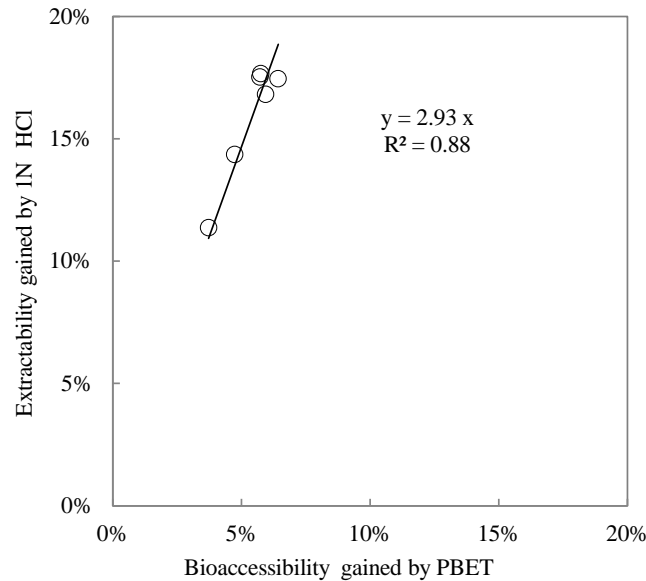


図1 1N HCl 抽出法による抽出率と PBET による Bioaccessibility の関係

### 3.3 汚染土壌の直接摂取による被ばく線量

本研究によって得られた土壌中  $^{137}\text{Cs}$  濃度及び Bioaccessibility を用いて、汚染土壌の直接摂取による被ばく線量を評価する。1F 事故後の経過時間を  $t$  とした場合に、期間  $t_1$  から  $t_2$  における被ばく線量  $D_{\text{soil}}$  は次のように表すことができる：

$$D_{\text{soil}} = \int_{t_1}^{t_2} SI \cdot A(t) \cdot f \cdot BA \cdot k \cdot dt$$

ここで、 $SI$  は 1 日あたりの土壌摂食量 (kg/日)、 $A(t)$  は事故後の経過時間  $t$  における土壌中  $^{137}\text{Cs}$  濃度 (Bq/kg)、 $f$  は粒径に係る濃縮係数、 $BA$  は Bioaccessibility、 $k$  は摂取量を実効線量に換算する係数 (Sv/Bq) である。

土壌摂食量は、土壌汚染リスク評価に関する技術的事項を定めた「土壌汚染対策法に係る技術的事項について」(中央環境審議会, 2002)<sup>17)</sup> をもとに子供 200 mg/日、大人 100 mg/日とした。土壌中  $^{137}\text{Cs}$  濃度は、本研究の調査で得られた土壌濃度の幾何平均を汚染発生日時 (2011 年 3 月 15 日) に減衰補正して  $5.5 \times 10^4$  Bq/kg とした。粒径による濃縮効果の係数  $f$  には、本研究での調査結果をもとに 2.6 を用いた。Bioaccessibility は本研究で得られた平均値 5.3% とした。摂食量を実効線量に換算する係数には国際放射線防護委員会 (ICRP) の Publ. 72 (ICRP, 1995)<sup>18)</sup> を参照して子供 (一歳児) に対して  $1.2 \times 10^{-8}$  (Sv/Bq)、及び大人に対して  $1.3 \times 10^{-8}$  (Sv/Bq) を用いた。

1F 事故後の各一年間に対して  $D_{\text{soil}}$  を評価した結果を図 2 に示す。1F 事故後の長期にわたって、 $^{137}\text{Cs}$  で汚染された土壌の直接摂取による被ばく線量は 1 年あたり数  $\mu\text{Sv}$  となった。ただし、事故直後及び数年間は他の短半減期核種や  $^{134}\text{Cs}$  の寄与が考えられる点に注意が必要である。 $^{134}\text{Cs}$  の線量換算係数は子供 (一歳児) に対して  $1.6 \times 10^{-8}$  (Sv/Bq)、及び大人に対して  $1.9 \times 10^{-8}$  (Sv/Bq) と  $^{137}\text{Cs}$  とほぼ同程度であるので、 $^{134}\text{Cs}$  が  $^{137}\text{Cs}$  と同濃度で土壌中に存在する場合に  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の Bioaccessibility が同じであると仮定すると、図 2 のおよそ 2 倍程度が放射性セシウムからの被ばく線量となる。

なお、本評価は保守的な評価となるように以下のような仮定を用いていることに注意を要する：(1) 土壌摂食量は日本で行われた調査結果 (環境省, 2001; 中央環境審議会, 2002)<sup>6),17)</sup> の 95% 値に基づいて定められていること、(2) 土壌摂食頻度を毎日と仮定していること、(3) Bioaccessibility の評価において空腹時を想定して胃の pH を設定していること、(4) 除染による濃度の低減を考慮していないことである。また、以下の点で変動性や不確実性が含まれると考えられるため、評価結果の解釈においては注意が必要である：(1) Bioaccessibility は土壌の質によって変動すること、(2) Bioaccessibility は土壌と汚染物質の結合状態の長期的な変化により変動する可能性があること、(3) 土壌の汚染濃度は空間的に変動が見られること、(4) ウェザ

リングや地中方向への拡散などの核種移行による濃度の減衰を考慮していないことである。被ばく線量の評価に際しては先述の保守的な仮定に加えて、これらの点についても不確かさと変動性を考慮する必要がある。特に Bioaccessibility については、様々な土壌を用いて継続的な調査と研究が必要である。

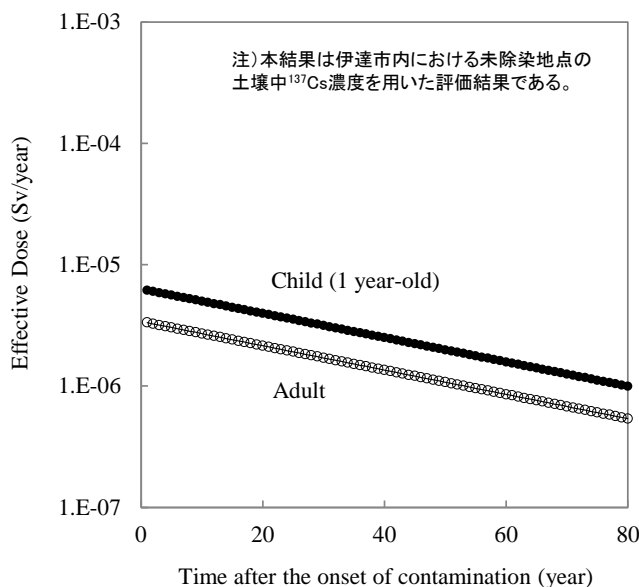


図2 本研究での土壌調査による  $^{137}\text{Cs}$  濃度及び Bioaccessibility に基づく土壌直接摂取による内部被ばく線量の評価 (2011年3月15日を起点とした各一年間での実効線量)

#### 4. まとめ

本研究では、土壌の直接摂取による被ばく線量を評価するために、1F事故によって影響を受けた現地の土壌を用いて PBET を行い  $^{137}\text{Cs}$  汚染土壌からの Bioaccessibility を評価した。また、環境省告示 19号に基づき 1N HCl 抽出実験を行い、その抽出率と Bioaccessibility との関係を調べた。PBET による Bioaccessibility は  $5.4\% \pm 1\%$ 、1N HCl による抽出率は  $16\% \pm 3\%$  となった。これらの両者には良い相関が観察されており、土壌の直接摂取によるリスクを評価する際には 1N HCl 抽出による抽出率を用いて保守的に評価できる可能性が示唆された。ただし、この結果を一般化するためには  $^{137}\text{Cs}$  と土壌の結合に関する長期的な変化や異なる土壌を用いた実験に基づくさらなる検討が必要である。また、本研究によって得られた土壌中  $^{137}\text{Cs}$  濃度及び Bioaccessibility をもとに、土壌汚染対策法に準ずる方法で  $^{137}\text{Cs}$  汚染土壌の直接摂取による被ばく線量を評価したところ、子供及び大人のいずれに対しても 1F 事故後の各 1 年間での実効線量は長期にわたって数  $\mu\text{Sv}/\text{年}$  程度となった。この結果は、未除染の場所において採取された土壌の調査結果を用いて、複数の保守的な仮定をもとに行われたものである。伊達市では公園等のように子供たちの利用頻度が高く公共性の高い施設は重点的に除染が進められており (伊達市, 2014)<sup>19)</sup>、この結果よりも大幅に低い線量になっているものと考えられる。今後、同経路による現実的な被ばく線量を明らかにするためには、Bioaccessibility に関する追加的な実験結果や評価に係る保守的な仮定の見直しを進めつつ、データやモデルパラメータの不確か性及び変動性を踏まえて評価結果を提示していくことが必要となる。

#### 5. 参考文献等

- 1) Ruby M. V., R. Schoof, W. Brattin, M. Goldade, G. Post, M. Harnois, D.E. Mosby, S. W. Casteel, W. Berti, M. Carpenter, D. Edwards, D. Cragin and W. Chappell (1999): Advances in Evaluating the Oral Bioavailability of Inorganic in Soil for Use in Human Health Risk Assessment, *Environ Sci Technol*, **33**, 3697–3705.
- 2) Oomen A. G., A. Hack, M. Minekus, E. Zeijdner, C. Cornelis, G. Schoeters, W. Verstraete, T. V. D. Wiele, J. Wragg, C. J. M. Rompelberg, A. J. A. M. Sips, and J. H. V. Wijnen (2002): Comparison of Five In Vitro Digestion Models To Study the Bioaccessibility of Soil Contaminants, *Environ Sci Technol*, **36**, 3326–3334.

- 3) Wragg J. and M. R. Cave (2003): In-vitro Methods for the Measurement of the Oral Bioaccessibility of Selected Metals and Metalloids in Soils: A Critical Review, Environment Agency R&D Technical Report P5-062/TR/01.
- 4) E. Calabrese (2011): Improving the Scientific Foundations for Estimating Health Risks from the Fukushima Incident, *PNAS* **108**, 19447–19448.
- 5) Ruby M. V., A. Davis, R. Schoof, S. Eberle and C. M. Sellstone (1996): Estimation of Lead and Arsenic Bioavailability Using a Physiologically Based Extraction Test, *Environ Sci Technol*, **30**, 422–430.
- 6) 環境省 (2003): 土壌含有量調査に係る測定方法を定める件, 環境省告示第 19 号.
- 7) Cave M. R., J. Wragg, B. Palumbo and B. A. Klinck (2003): Measurement of the Bioaccessibility of Arsenic in UK Soils, Environment Agency R&D Technical Report P5-062/TR02.
- 8) Ikegami M. M. Yoneda, T. Tsuji, O. Bannai and S. Morisawa, (2014): Effect of Particle Size on Risk Assessment of Direct Soil Ingestion and Metals Adhered to Children's Hands at Playgrounds, *Risk Anal*, **34**, 1677–1687.
- 9) F. R. Livens and M. S. Baxter (1988): Particle Size and Radionuclide Levels in Some West Cumbrian Soils, *Sci. Total Environ.*, **70**, 1–17.
- 10) Q. He and D. E. Walling (1996): Interpreting Particle Size Effects in the Adsorption of <sup>137</sup>Cs and Unsupported <sup>210</sup>Pb by Mineral Solids and Sediments, *J. Environ. Radioactivity*, **30**, 117–137.
- 11) P. Spezzano (2005): Distribution of pre- and post-Chernobyl Radio Caesium with Particle Size Fractions of Soils, *J. Environ. Radioactivity*, **83**, 117–127.
- 12) A. Sakaguchi, M. Yamamoto, M. Hoshi, T. Imanaka, K. N. Apsalikov and B. I. Guesv (2006): Radiological Situation in the Vicinity of Semipalatinsk Nuclear Test Site: Dolon, Mostik, Cheremushka and Budene Settlements, *J. Radiat. Res.*, **47**, Suppl., A101–A116.
- 13) A. Sakaguchi, K. Tanaka, H. Iwatani, H. Chiga, Q. Fan, Y. Onda and Y. Takahashi (2015): Size Distribution Studies of <sup>137</sup>Cs in River Water in the Abukuma Riverine System Following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident, *J. Environ. Radioactivity*, **139**, 379–389.
- 14) S. C. Sheppard (1995): Parameter Values to Model the Soil Ingestion Pathway, *Environ Monit Assess*, **34**, 27–44
- 15) Hamel S.C., B. Buckley and P. J. Lioy (1998): Bioaccessibility of Metals in Soils for Different Liquid to Solid Ratios in Synthetic Gastric Fluid, *Environ Sci Technol*, **32**, 358–362.
- 16) 坂内修, 辻貴史, 米田稔, 森澤眞輔 (2003): 土壌重金属汚染の測定と土壌の直接摂取による健康リスクの評価, 環境工学研究論文集, **40**, 659–666.
- 17) 中央環境審議会 (2002): 土壌汚染対策法に係る技術的事項について (答申) .  
Available at: <https://www.env.go.jp/council/toshin/t10-h1407.html> (Accessed 16 February 2015)
- 18) ICRP (1995): Age-dependent Doses to the Members of the Public from Intake of Radionuclides - Part 5 Compilation of Ingestion and Inhalation Coefficients, *Ann. ICRP* 26 (1).
- 19) 伊達市 (2014): 伊達市除染実施計画 (第 2 版一部改訂) .  
Available at: <http://www.city.date.fukushima.jp/uploaded/attachment/12200.pdf> (Accessed 16 February 2015)

#### 謝辞

本研究を進めるにあたり現地土壌の採取にご協力くださった伊達市市役所の皆様、及び日本原子力研究開発機構 福島環境安全センターの皆様に感謝いたします。