

201425015A

厚生労働科学研究費補助金

労働安全衛生総合研究事業

除染等作業における作業環境の線量率・土壌中放射能濃度と  
労働者の身体汚染の関係に関する研究

平成26年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 辻村 憲雄

平成27(2015)年 3月

厚生労働科学研究費補助金  
労働安全衛生総合研究事業

除染等作業における作業環境の線量率・土壌中放射能濃度と  
労働者の身体汚染の関係に関する研究

平成 26 年度 総括・分担研究報告書

研究代表者 辻村 憲雄

平成 27 (2015) 年 3 月

## 目 次

I. 総括研究報告 .....	5
除染等作業における作業環境の線量率・土壤中放射能濃度と 労働者の身体汚染の関係に関する研究 辻村 憲雄（日本原子力研究開発機構） .....	7
II. 分担研究報告 .....	31
線量当量率と土壤中放射能濃度に関する研究 .....	33
斎藤 公明（日本原子力研究開発機構） .....	
III. 研究成果の刊行に関する一覧表 .....	37
IV. 研究成果の刊行物・別刷 .....	39

# I. 総括研究報告

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）  
総括研究報告書

除染等作業における作業環境の線量率・土壤中放射能濃度と  
労働者の身体汚染の関係に関する研究

研究代表者 辻村 憲雄（日本原子力研究開発機構）

研究要旨

除染等作業現場の線量当量率及び土壤中放射能濃度と作業者の身体汚染の程度の関係に関する知見を得ることを目的に、(1) 線量当量率と土壤中放射能濃度の関係、(2) 作業服等への土壌の付着密度、さらに(3) 除染等作業に実際に従事した者の作業服等の表面に付着した放射性物質の表面密度に係る研究を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 線量当量率と土壤中放射能濃度の関係については、文部科学省からの委託事業として日本原子力研究開発機構が中心となって測定・収集したデータを分析するとともに、計算シミュレーションによる評価を行った。その結果、少なくとも直径 30 cm の広がりをもった汚染土壌については、その緩衝深度に関係なく、地表 5 cm での線量当量率が 5  $\mu\text{Sv/h}$  未満であれば放射能濃度は 500 Bq/g（平成 26 年 4 月現在）を超えないと判断できることが分かった。
- (2) 作業服、手袋、及び長靴への土壌の付着密度を実験によって調べた。付着密度は、土の種類よりも水分量に依存し、水分量が増えるにつれ増加することを確認した。作業服及び手袋の付着密度は、含水率 30～50%の黒土で 10～30 mg/cm<sup>2</sup>であり、放射能濃度 500 Bq/g を仮定したとしても表面密度限度を超えそうにない。一方、長靴については、降雨後の畑での歩行において 500 mg/cm<sup>2</sup> を超える付着密度が観測され、濃度によっては表面密度限度を大きく超える可能性が高い。付着しやすい土壌での作業で、かつ高濃度の場合は、汚染検査を受ける前に土汚れをできるだけ取り除く何らかの対応が必要である。
- (3) 居住制限区域の環境（土壌中の平均放射能濃度 5～14 Bq/g）で除染作業に従事した作業員（15 人）の着用した作業服、手袋、及び長靴について放射能測定を行った。比較的ウエットな農地での除染作業に従事した者の長靴から最大 2,000 Bq を超える放射能が観測されたものの、表面密度は最大でも 5.1 Bq/cm<sup>2</sup> と低い値であった。また、靴底に付着した土の付着密度を調べた結果、(2)の歩行試験で得られた値と同程度の値であること、また、平均的な土の付着密度と放射能濃度の乗算から表面密度の推定が可能であることが確認された。

研究分担者	
齋藤 公明	(日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター)
研究協力者	
三上 智	(日本原子力研究開発機構 福島環境安全センター)
吉田 忠義	(日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所)
星 勝也	(日本原子力研究開発機構 核燃料サイクル工学研究所)

### A. 研究目的

本研究は、福島第一原子力発電所事故によって環境中に放出された放射性物質の除染等作業において、作業現場の線量率・土壌中放射能濃度と労働者の身体汚染の程度、すなわち作業服等を含む身体の表面密度の関係を明らかにするとともに、作業現場での簡易な測定から労働者の身体の表面密度を十分な安全裕度で推定する方法を確立し、除染等作業における労働者の合理的な防護対策の立案と実施に資することを目的とする。

### 背景

福島第一原子力発電所事故によって放出された放射性物質の除染等作業が、専門業者だけでなく住民・ボランティア等によっても行われている。当該作業の実施にあたって最も重要な点は、労働者の放射線障害を防止することである。こうした目的で、「東日本震災により生じた放射性物質により汚染された土壌等を除染するための業務等に係る電離放射線障害防止規則」[1]並びに「除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン」[2]が制定

されており、汚染拡大防止の一環として、例えば、作業場所から退去する者について汚染検査を実施し、身体汚染の程度、すなわち作業服を含む身体表面に付着した放射性物質の表面密度(単位面積当たりの放射能)が表面密度限度  $40 \text{ Bq/cm}^2$  以下であることを確認することが定められている。しかしながら、除染作業現場の線量率・土壌中放射能濃度と、労働者の身体の表面密度の関係に関する知見が十分ではないため、除染対象物の放射能濃度の大小(例えば  $50 \text{ 万 Bq/kg}$  を超える高濃度汚染土壌であるか否か)に関係なく、一律の汚染検査の実施が求められている。このことは、例えば汚染レベルが極めて低い作業現場においては、著しく非効率かつ不合理な管理につながるおそれがあるため、除染現場の放射線状況や予測される身体の表面密度に応じて検査の要件を緩和するなど、より弾力的な対応をとることが望ましい。

報告者らは、上記課題について平成 25～26 年度の二年間計画で当該研究「除染等作業における作業環境の線量率・土壌中放射能濃度と労働者の身体汚染の関係に関する研究」に取り組んできた。本報告書は、平成 26 年度実施分の報告である。

### B. 研究方法

研究は、(1) 線量当量率と土壌中放射能濃度の関係、(2) 作業服等への土壌の付着密度の評価、及び(3) 除染等作業における作業者の身体の表面密度の評価からなる。それぞれの研究方法を以下に示す。なお、本報告書中で使用する用語「線量当量」は「周辺線量当量」を指す。

## 1. 線量当量率と土壤中放射能濃度の関係に係る研究方法

放射性セシウムに汚染された環境における線量当量率 (Sv/h) と土壤中放射能濃度 (Bq/g) の関係を実測と計算によって評価する。前者の実測は、日本原子力研究開発機構 (以下、「原子力機構」と記す) が文部科学省からの委託研究として福島県内で実施した放射線モニタリングの結果 (平成 25 年度実施分) の分析に基づく。後者の計算は、放射性セシウムによって局所的に汚染された箇所をモデル化した体系におけるモンテカルロ光子輸送計算による。平成 25 年度に実施した計算は、十分な広がりを持つ円板土壌と高さ 200 m の空気からなる体系を基本とし、地表に  $^{134}\text{Cs}$  及び  $^{137}\text{Cs}$  線源を適当な広がり度で分布させたときの地上 5 cm 及び 100 cm における線量当量率と地表面の放射能濃度の関係を調べた。今年度は、線源の広がり度のバリエーションを、ラジアル方向についてはより様々な直径で、深さ方向には緩衝深度をより深く、すなわち  $1.2\text{ g/cm}^2$  を  $1.6\sim 2.0\text{ g/cm}^2$  にしたときの関係について調べる。平成 25 年度の報告から、線量当量率を放射能濃度に関連付ける場合、地表面に近接させた位置での測定が有利であることが判明しているため、ここでは高さ 5 cm での計算を中心に行う。また、放射性セシウムの壊変に伴って線量当量率がどのような時間変化を示すかを整理する。計算体系を図 1、計算条件を表 1 に示す。表中の下線部が新たに追加した計算項目である。

## 2. 作業服等への土壌の付着密度の評価方法

同じ放射能濃度の土を取り扱う場合、作業服等の表面密度 ( $\text{Bq/cm}^2$ ) と土壌の付着密度 ( $\text{g/cm}^2$ ) は比例すると考えられるので、ここでは、後者の付着密度に着目した試験を行う。使用した作業服 (A~C) と手袋 (D~F) の仕様を表 2 に示す。

### (1) ピリング試験

JIS L 1919 防汚性試験 [3] (粉体汚染物質による繊維の汚れにくさを調べる) に定める手順に基づき、標準的試験条件において一般的なポリエステル製の作業服に土がどれだけ付着するかを調べる。作業服から  $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$  に裁断した試験布 (A) と  $10\text{ g}$  の土を封じたプラスチック容器を ICI 形ピリング試験機の回転箱に入れて毎分約 60 回転の速度で 20 分間攪拌し、試験布に土を付着させる。攪拌後、取り出した試験布の質量を電子天秤で測定し、その増分を接触面積で除することによって付着密度に換算する。実験に使用した土は、茨城県内の建材業者から入手した「黒土」、「赤土」及び「川砂」であり、それぞれの仕様を表 3 に示す。このうち黒土については、水を添加し、含水率を約 50% に調整したものも使用する。一回の試験につき 3 枚の試験布を使う。

### (2) 動的荷重試験

平成 25 年度の報告で実施した動的荷重試験を、試験に用いる黒土の水分量を変えて再度行う。使用する試験布は平成 25 年度に使用したものと同一素材で、作業服から  $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$  に裁断した三種類 (A: ポリエステル製, B: ポリエステル・綿混製, 及び C: ナイロン製 (雨合羽)) である。黒土は、表 3 に示したもの (生土) を基本に、それを暗所に放置して乾燥させたもの (乾

土), 水を添加して含水率約 50%に調整したもの(湿土)の三種類とする。台ばかり上に固定した試験布の上に 10 g の土を均等に載せ, その上からゴム板を約 0.2 kg/cm<sup>2</sup>で押し付けつつ前後に小刻みに動かすことによって土を擦り付ける。試験布の質量の測定は, 試験片の縁をクリップで摘み空中で数回振りまわすことによって付着した土のうち容易に剥落する成分を取り除いてから行う。試験手順を図 2 に示す。一回の試験につき 3 枚の試験布を用いる。気温・湿度によって水分量がわずかに変化すると考えられる生土等については, 試験日時を変えて 3~4 回繰り返す。

### (3) 手袋への土壌付着試験

三種類の手袋(D:すべり止め付き軍手, E:すべり止めなし軍手, 及びF:ゴム製)を試験者が着け, (2)動的荷重試験で使用したものと同一黒土約 100 g を両手で握りしめ掌上で揉む行為を 10 回繰り返す。前後の手袋の質量変化を測定することで土の付着量を評価する。測定は, 手袋の両掌を軽くこすり合わせるなどして容易に剥落する土を払い落としてから行う。試験手順を図 3 に示す。一回の試験につき 3 双使用する。気温・湿度によって水分量がわずかに変化すると考えられる生土等については, 試験日時を変えて 3~4 回繰り返す。接触面積は 160 cm<sup>2</sup> (片手) とする。なお, 手袋に汗等が付着しないよう試験者はポリエチレン製の薄い手袋を内側にはめて実験を行う。

### (4) 長靴への土壌付着試験

長靴を履いて屋外の土が露出した場所を歩行し, 靴底に土を付着させる。土の付着前後の質量を測定し, その増分を接触面積で除することによって付着密度に換算する。

使用した 3 種類の長靴(G, H 及び I)の靴底のパターンと面積を図 4 に示す。

歩行した場所は, 畑(収穫後に地表を掘り返した状態), 運動場・公園(植栽物のない土が露出した遊び場)等であり, 土壌の主成分はそれぞれ黒土, 川砂等からなる。同じ場所を, 降雨後と降雨後しばらく晴天が続いた後に歩行し, 土の付着の程度を比較する。歩数は, 5,000 歩又は 500 歩とし, 試験者が身に着けた歩数計で計測する。

長靴の質量は, ①歩行終了直後に長靴を秤量済みのポリ袋に收容した場合, ②長靴を再び履き, 平坦なコンクリート面に靴底を打ちつけるなどして余分な土を取り除いた場合, ③(②に続いて)泥落とシマットに靴底を擦り付けて土を落とした場合, ④(③に続いて)ブラシを用いて長靴の側面等に付着した土を落とした場合, さらに⑤(④に続いて)深さ 5 cm 程度に水を張った桶に長靴を浸しつつ, ブラシがけして土を落とした場合のそれぞれについて, 左右別々に測定する。降雨後の畑での歩行試験の様子と靴底への土の付着の程度を図 5, 靴底から土を取り除く動作(②~⑤)をしたときの様子を図 6 に示す。なお, 試験者は, 体重 60~80 kg の成人男性である。歩行に際して, 長靴に汗等が付着しないよう靴下の上にポリエチレン袋をかぶせる等の対策をする。

## 3. 除染等作業における作業者の表面密度(放射能)の評価方法

除染作業に従事した作業者が着用した作業服, 手袋及び長靴について放射能測定を実施し, 放射性表面汚染の程度を評価する。

平成 26 年度は, 除染事業者(大成・熊谷・

東急特定建設工事共同企業体)の協力のもと、福島県内の居住制限区域において、重機を使用することなく除染作業に一日間従事した作業者を対象とする。作業者は、3グループ×5名の計15名であり、それぞれのグループの主たる作業は、農地除染(表土の削り取り)、宅地除染(屋根・壁の拭き取り、庭の表土の削り取り)、仮仮置場建設である。各作業者には、事前に未使用の作業服、手袋(綿手袋+ゴム手袋)及び長靴(図4のI型)を渡しておき、作業終了後に除染事業者の定める手順に従ってそれぞれについて汚染検査を実施し、表面密度限度を超えていないことを確認してから回収する。

測定は、鉄遮へい体内に据え付けたPGT社製IGC-10200型高純度Ge半導体検出器で行う。パルス波高スペクトルの分析にはFitzPeaks Ver. 3.71を使用する。効率は、作業服及び手袋を一樣な体積線源、長靴の底を一樣な面線源と仮定して、放射能既知の $^{137}\text{Cs}$ ポイント線源による校正と計算シミュレーションの組み合わせから、それぞれの形状に合わせて決定される。また、長靴の放射能測定終了後に、それぞれの靴底から採取した土について、秤量及び放射能測定を行い、土壤中放射能濃度を求める。

作業現場の線量当量率は、アロカ日立メディカル製TCS-161型線量当量率サーベイメータ及びEMFジャパン製EMF211型NaI(Tl) $\gamma$ 線スペクトロメータを用いて地上1mで測定したところ、1~2 $\mu\text{Sv/h}$ であった。作業現場の地形等を考えるに周囲に放射性セシウムが広く分布した環境と考えられる。

(倫理面への配慮)

本研究は、特定の個人(またその体から採取された試料等)を対象としたものではないので人権擁護上の配慮等を特に必要としない。なお、放射性セシウムによる汚染地域での活動は、電離則等関係法令の適用下において実施したものであり、特別な不利益や危険性等は発生しない。

## C. 研究結果

### 1. 線量当量率と土壤中放射能濃度の関係

平成25年6月に福島県内各地で実施した放射線モニタリングの結果[4]によると、人為的かく乱の少ない平坦な開かれた地形における地表1mでの線量当量率(自然放射線による寄与を含む)観測値1.0 $\mu\text{Sv/h}$ は、34.2 $\text{Bq/cm}^2$ (内訳: $^{134}\text{Cs}$  11.4 $\text{Bq/cm}^2$ ,  $^{137}\text{Cs}$  22.8 $\text{Bq/cm}^2$ )の沈着密度に相当する。別に評価された同時期における緩衝深度2.06 $\text{g/cm}^2$ を用いると、この沈着密度は、表層の放射能濃度16.6 $\text{Bq/g}$ に換算される。

一方、観測とほぼ同じ条件(緩衝深度2.0 $\text{g/cm}^2$ )でのシミュレーション計算結果は、

$^{134}\text{Cs}$ : 1 $\text{Bq/cm}^2$ 当たり0.045 $\mu\text{Sv/h}$

$^{137}\text{Cs}$ : 1 $\text{Bq/cm}^2$ 当たり0.017 $\mu\text{Sv/h}$

である。 $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ の沈着密度を観測された値(それぞれ11.4 $\text{Bq/cm}^2$ , 22.8 $\text{Bq/cm}^2$ )と同じとすると、両核種による合計の線量当量率は、0.90(=0.045×11.4+0.017×22.8) $\mu\text{Sv/h}$ になる。上述した観測値には自然放射線による寄与も含まれていることを考えると、本計算結果は、観測結果をほぼ再現すると言える。

また、汚染土壌の広がりを変えたシミュレーション計算結果のうち、汚染土壌の直径と地上5cmにおける線量当量率の関係

を図 7 に示す。ここでは、靴底等の表面密度に直接的に関係すると考えられる地表面の放射能濃度を高濃度汚染土壌に相当する 500 Bq/g (50 万 Bq/kg), その中に含まれる  $^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  の内訳を, 平成 26 年 4 月の濃度比 0.38 に基づくものとした。図は, 線源の直径が大きくなるにつれて, さらに緩衝深度が長く (深く) なるにつれて, 線量当量率が増加することを示す。これは, 地表面の放射能濃度をある値に固定する場合, 線源直径と緩衝深度の増加は, 線源領域に含まれる放射能の総量の増加を意味するためである。図から, 汚染土壌の広がり直径 30 cm 以上であれば高さ 5 cm での線量当量率は, 緩衝深度 (の今後の変化) に関係なく, 約 5  $\mu\text{Sv/h}$  を超える。また, 上記直径 (30 cm) において最小の線量当量率を与える緩衝深度 (1.2 g/cm<sup>2</sup>) について, 線量当量率を時刻の関数として表したものを図 8 に示す。

## 2. 作業服等への土壌の付着密度の評価結果

### (1) ピリング試験

ピリング試験によって得られた土壌の付着密度を表 4 に示す。黒土, 赤土及び川砂間で付着密度に大きな違いは見られず, いずれも約 1 mg/cm<sup>2</sup>であった。一方, 水を添加した黒土 (湿土) では約 11 mg/cm<sup>2</sup>に増加した。これらの値は, 藤原ら[5]によるタオルを用いた実験と同じオーダーであった。

### (2) 動的荷重試験

動的荷重試験によって得られた土壌の試験布 (作業服) への付着密度を表 5 に示す。水分が増えるにつれて付着密度は増加した。付着密度は約 1~20 mg/cm<sup>2</sup>の範囲であり,

(1)のピリング試験の付着密度よりもやや大きな値であった。また, 本結果は, 米軍による模擬フォールアウト上でのほふく前進実験の結果 (0.5~13 mg/cm<sup>2</sup>) [6]や英軍による同種実験の結果 (0.3~28 mg/cm<sup>2</sup>) [7]とよく合う。

### (3) 手袋への土壌付着試験

試験結果を表 6 に示す。乾土・生土での付着密度は, 軍手 (D 及び E) > ゴム手袋 (F) であり, 編み目の粗い軍手には一般的な作業服素材よりも土が付着しやすいようである。作業服と同様に水分が増えるにつれて付着密度は増加し, 観測された付着密度の平均値は, 湿土で 30 mg/cm<sup>2</sup>であった。また, 観測された最大値は約 50 mg/cm<sup>2</sup> (手袋 F) であった。

### (4) 長靴への土壌付着試験

歩行試験で得られた結果を表 7 に示す。試験当日の天候と直近の降雨情報をもとに, 試験条件を「晴天時」と「降雨後」に便宜的に分類した。

同じ場所での歩行試験であっても, 降雨後の付着密度は晴天時の付着密度に比べて圧倒的に大きい。例えば, 収穫後に地表を掘り返した畑の場合, 降雨後の付着密度は, 歩行終了直後の①で 2,000~4,000 mg/cm<sup>2</sup> (図 5 の状態), 常識的な衛生習慣に基づいて靴の土汚れを落とした場合に相当すると考えられる②の動作後で 450~1,100 mg/cm<sup>2</sup>に達した。この値は, 道具を使用して土汚れを除去することによって徐々に減少し, ⑤では約 50 mg/cm<sup>2</sup>まで落ちた。一方, 運動場・公園での付着密度は, 畑での付着密度に比べて小さいことが確認された。なお, 歩数 (5000 歩と 500 歩) による付着密度に大きな違いは見られなかった。

靴底への土壌の付着密度は、前述した作業服・手袋への付着密度に比べて圧倒的に大きいことが確認された。

### 3. 除染等作業における作業者の表面密度（放射能）の評価結果

除染作業現場の様子を図 9 に示す。また、靴底への土の付着の程度の一例として、最大の放射能が観測された長靴（主に農地での作業で使用された）の写真を図 10 に示す。

作業者が着用した作業服、手袋及び長靴から観測された放射能、表面密度、及び靴底から採取した土の放射能濃度を表 8 に示す。ここで、表面密度は放射能を接触面積で除して算出したものである。手袋と長靴については、実測に基づき接触面積をそれぞれ 320 及び 400 cm<sup>2</sup> とした。土壌に接した範囲が明確に決められない作業服については、保守的に評価するため 100 cm<sup>2</sup> (10 cm × 10 cm) を仮定した。

作業服、手袋（綿手袋とゴム手袋の合計）、及び長靴の放射能の最大は、それぞれ 190, 24, 及び 2,050 Bq であり、長靴の放射能が圧倒的に大きい。作業グループ別にみると、主に農地で除染作業を行った者の長靴から高い放射能が観測された。作業服と手袋については全体的に低めであるが、宅地除染作業に従事した作業グループは他のグループよりもやや高めである。

表面密度については、農地で除染作業を行った者の長靴から最大 5.1 Bq/cm<sup>2</sup> が観測された。手袋はいずれも 0.1 Bq/cm<sup>2</sup> に満たない。作業服については、接触面積を小さく見積もった場合でさえ最大 1.9 Bq/cm<sup>2</sup> であった。いずれも表面密度限度 (40 Bq/cm<sup>2</sup>) を大きく下回る結果であった。

靴底から採取した土の放射能濃度は、作業グループで違いが見られた。最大は、主に農地で作業したグループからで、平均約 14 Bq/g (1.5~22 Bq/g) であった。なお、作業者の歩数は、一日当たり 5,400~16,000 歩 (平均 11,000 歩) であり、作業グループ間で大きな相違はなかった。

## D. 考察

### 1. 線量当量率に基づく土壌中放射能濃度の推定

土壌中放射能濃度と線量当量率の関係は一律ではなく、特に汚染土壌の広がりによって変化する。ただし、図 7 に示したように、広がり幅を 30 cm 以上に限定すれば、地表面の土壌中放射能濃度 500 Bq/g (50 万 Bq/kg) に相当する地上 5 cm の線量当量率は、緩衝深度の大小に関係なく 5 µSv/h を超える。ゆえに、線量当量率サーベイメータによる測定で 5 µSv/h に満たない指示値が観測された場合、その真下の土壌中放射能濃度は 500 Bq/g (50 万 Bq/kg) を超えないと判断することができる (濃度 100 Bq/g を超えるか否かを知りたい場合は、指示値 5 µSv/h を 1 µSv/h に読み替えればよい)。上記の濃度と線量当量率の関係は、平成 26 年 4 月現在の <sup>134</sup>Cs/<sup>137</sup>Cs 比 0.38 に基づいた値であるが、<sup>137</sup>Cs に比べて半減期が短く、また線量当量率への寄与が大きい <sup>134</sup>Cs の壊変によって、合計放射能濃度が同じであっても線量当量率は今後徐々に低下する。濃度と線量当量率の関係の将来的な変化については、図 8 から知ることができる。

### 2. 土の最大付着密度と最大表面密度の推定

ピリング試験の結果から、作業服表面への土の付着は、土の種類よりも水分量に依存することが確認された。また、ピリング試験と動的荷重試験の比較では、後者の方がやや大きい付着密度となった。ピリング試験は、繊維に粉体汚染物質を均一に付着させることができる反面、外部から強い力が加えられたときの汚れの付着具合を再現しないとの指摘がある[8]。付着密度の最大値を得る目的においては、今回実施した動的荷重試験の方が適していると考えられる。

試験布と手袋への土の付着密度を比較した結果を図 11 に示す。図の右軸には、放射能濃度を 500 Bq/g 及び 100 Bq/g と仮定したとき、その放射能濃度と土の付着密度の乗算から算出される放射性表面密度を示す。特別の撥水加工がなされていない作業服(A 及び B) や手袋 (D 及び E) への付着密度は、10~30 mg/cm<sup>2</sup>であり、これは 500 Bq/g の土壤中放射能濃度を仮定すると 5~15 Bq/cm<sup>2</sup>に相当する。一方、撥水加工され滑らかな表面を持つ素材 (C 及び F) の場合、乾土・生土ではほとんど付着せず、湿土で急激に付着量が増える傾向が観測された。これは、外部から加圧によって土粒子間に保持されていた水が滲み出し、それが土粒子と繊維表面の隙間を埋めるなど、あたかも接着剤のような働きをした結果と考えられる(撥水加工されていない素材は水分を吸収する)。ただし、そうした場合であっても、観測された付着密度は最大で約 50 mg/cm<sup>2</sup>であり、放射能濃度 500 Bq/g を仮定したとき 25 Bq/cm<sup>2</sup>に相当するに過ぎない。以上の結果から、作業服及び手袋については、500 Bq/g を超える極めて高い濃度の汚染土壌を取り扱う作業でない限り、土

の付着によって表面密度限度 (40 Bq/cm<sup>2</sup>) を超える汚染は生じそうにない。

歩行試験から得られた靴底の土壌付着密度が、靴底を地面に打ち付けるなどの除去動作によってどれだけ変わるかを図 12 (運動場・公園) 及び図 13 (畑) に示す。図には、放射能濃度 500 Bq/g 及び 100 Bq/g を仮定したとき、表面密度限度に相当する土壌付着密度を矢印で示す。ここで、常識的な衛生習慣に基づいて靴底の土汚れを落とした場合に相当すると考えられる②を基準に考えると、何ら追加の除去動作もすることなしに靴底の表面密度が限度を超えないのは、比較的乾いた状態の地面を歩行した場合に限られる。反対に、降雨等(除染作業時等の発塵防止のための散水を含む)によって地面が濡れている場合は、放射能濃度 500 Bq/g での表面密度限度相当である付着密度 (80 mg/cm<sup>2</sup>) 未満まで付着した土を落とすには、除去動作⑤のように道具を使用しつつ水洗いするなどの対応を必要とすると考えられる。また、放射能濃度 100 Bq/g であれば、相当する土壌付着密度は 400 mg/cm<sup>2</sup>まで緩和される。この場合、除去動作③泥落としマットの利用や④のブラシがけなどは、その付着密度未満まで土を落とす確実な手段とも言えるし、また土質によっては、靴底を地面により念入りに打ちつけるなどの対応でも十分かもしれない。

### 3. 高濃度汚染土壌の場合に予想される表面密度

土の付着密度を、作業服及び手袋については図 11 から一律に 30 mg/cm<sup>2</sup>、長靴については図 13 から 1000 mg/cm<sup>2</sup> (②条件相

当) とすると、除染作業現場の土壌中放射能濃度(平均約 14 Bq/g)との乗算から予測される最大表面密度は、作業服・手袋、長靴それぞれについて、0.42, 14 Bq/cm<sup>2</sup>となる。この値は、実際に観測された表面密度(それぞれ 1.9, 5.1 Bq/cm<sup>2</sup>)と大きく違わない。

除染作業に従事した者が着用した作業服と手袋からは、目立った土汚れは目視で識別されず、土に直に接することのない(あるいは、無用な土汚れを付けないような作業手順上の工夫や訓練がなされていた)作業であったこと示唆する。一方、土との接触が不可避な長靴については、図 10 にも示したように多くの土の付着が見られ、また作業服・手袋を超える放射能が観測された。これらの事実は、放射性表面汚染の管理にあたって最も注意を払うべきは長靴であることを示す。その長靴の表面密度(Bq/cm<sup>2</sup>)を、それぞれの靴底から採取された土の放射能濃度(Bq/g)で除して、土壌付着密度(g/cm<sup>2</sup>)を算出した結果を表 9 に示す。また、その結果に基づき、土壌中放射能濃度を 500 Bq/g 及び 100 Bq/g と仮定したときに予想される表面密度も同表に示す。比較的ウエットな農地の除染作業に従事した作業員(1~5 番)の長靴の土壌付着密度は全体的に高めであり、約 100~500 g/cm<sup>2</sup>であった。これは、降雨後に畑で実施した歩行試験の結果(②~③条件)に近い値である。放射能濃度 500 Bq/g を仮定した場合、計 15 人の作業員中、農地除染に従事した作業員全員を含む 10 人が、放射能濃度 100 Bq/g を仮定した場合、1 人が表面密度限度 40 Bq/cm<sup>2</sup>を超えるという予想となった。本結果は、付着しやすい土壌(水分の多い黒土

等)での作業で、かつ高い放射能濃度の場合、土汚れを取り除く何らかの対応をすべきだとする前節の提言を支持するものである。

なお、付着しにくい砂岩質の土壌で作業に従事した者(帰還困難区域の道路工事現場、平成 25 年度報告書参照)についても同様に表 9 に整理したところ、靴底の土壌付着密度は最大でも 20 mg/cm<sup>2</sup>程度であり、運動場・公園等での歩行試験で観測された値を再現するものであった。

## E. 結論

除染等作業現場の線量当量率・土壌中放射能濃度と作業員の身体汚染の程度に関する知見を得ることを目的に、(1) 線量当量率と土壌中放射能濃度の関係、(2) 作業服等への土壌の付着密度、さらに(3) 除染等作業に従事した作業員の身体の表面密度に係る研究を行った。

その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 線量当量率と土壌中放射能濃度の関係を計算シミュレーションによって評価した。その結果、少なくとも直径 30 cm の広がりをもった汚染土壌については、その緩衝深度に関係なく、地表 5 cm での線量当量率が 5 µSv/h 未満であれば放射能濃度は 500 Bq/g (平成 26 年 4 月現在)を超えないと判断できることが分かった。
- (2) 作業服、手袋、及び長靴への土壌付着密度を実験によって調べた。付着密度は、土の種類よりも水分量に依存し、水分量が増えるにつれ増加することを確認した。作業服及び手袋の最大付着密度は、含水率約 30~50%の黒土で 10~30 mg/cm<sup>2</sup>であり、放射能濃度 500 Bq/g を仮定した

としても表面密度限度を超えそうにない。一方、長靴については、降雨後の畑での歩行試験において 500 mg/cm<sup>2</sup> を超える付着密度が観測され、濃度によっては表面密度限度を大きく超える可能性が高い。付着しやすい土壌での作業で、かつ高濃度の場合は、汚染検査を受ける前に土汚れをできるだけ取り除く対応（泥落としマット、ブラシがけ、水洗い等）が必要である。

(3) 土壌中の平均放射能濃度 5~14 Bq/g の環境で除染作業に従事した作業員(15人)の着用した作業服、手袋、及び長靴について放射能測定を行った。比較的ウェットな農地での除染作業に従事した者の長靴から最大 2,000 Bq を超える放射能が観測されたものの、表面密度は最大でも 5.1 Bq/cm<sup>2</sup> と低い値であった。また、靴底に付着した土の付着密度を調べた結果、(2)の歩行試験で得られた値と同程度の値であること、また、平均的な土の付着密度と放射能濃度の乗算から表面密度の推定が可能であることが確認された。

#### 文献

- [1] 厚生労働省;東日本震災により生じた放射性物質により汚染された土壌等を除染するための業務等に係る電離放射線障害防止規則,平成 24 年 1 月 1 日施行,平成 25 年 4 月 12 日改正.
- [2] 厚生労働省;除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン,平成 23 年 12 月 22 日制定,平成 25 年 12 月 26 日改正.
- [3] 日本規格協会,繊維製品の防汚性試験方法, JIS L 1919, (2012).

[4] 日本原子力研究開発機構;「平成 25 年度東京電力(株)福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立事業」成果報告書,平成 26 年 3 月,入手先

<http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/504/list-1.html>

[5] 藤原慶子,山崎敬三,高橋知之,高橋千太郎,北川晃三,神藤克人;放射性セシウムを含有した土壌によるタオルの汚染と洗濯による除去効果,保健物理,47(4),282-285 (2012).

[6] R. H. Black; Some factors influencing the  $\beta$ -dosage to troops, Health Phys. 8, 131-141 (1962).

[7] E. Neale and K. Sinclair; Radiological contamination: clothing trials, Porton Technical Paper No.(R)33, Chemical Defence Experimental Establishment, (1961).

[8] 明歩谷英樹;ユニフォーム上の汚れ発生メカニズムに関する研究,工業技術研究報告書 No.37,新潟県工業技術総合研究所,(2008).

#### F. 健康危険情報

該当無し

#### G. 研究発表

口頭発表

辻村憲雄,吉田忠義,星勝也;除染等作業における被服への土壌の付着量に基づく放射性表面汚染密度の評価,日本原子力学会 2014 年秋の大会 P51,京都大学,2014.

辻村憲雄,吉田忠義,星勝也;局所的土壌

汚染における土壌中放射性セシウム濃度  
と線量当量率の関係，日本放射線安全管理学会第 13 回学術発表会，徳島大学，  
2014.

星勝也，吉田忠義，辻村憲雄；除染等作業  
における体表面汚染に関する研究（1）  
靴底への土壌付着量の評価，日本原子力  
学会 2015 年春の年会 L55，茨城大学，  
2015.

辻村憲雄，吉田忠義，星勝也；除染等作業  
における体表面汚染に関する研究（2）  
労働者の作業服等の放射能測定，日本原  
子力学会 2015 年春の年会 L56，茨城大  
学，2015.

H. 知的財産権の出願・登録状況（予定を含  
む）

なし

表 1 地表に沈着した放射性セシウムから放出されるγ線による線量当量率の計算条件  
(下線部は新たに追加した項目である)

計算モデル	円形汚染
汚染の広がり (ラジアル方向)	一様分布 半径： <u>5</u> , <u>10</u> , 15, 25, <u>50</u> , 100 cm 及び 200 m
汚染の深さ (鉛直方向)	指数関数分布 *1 緩衝深度 (β)： <u>1.2</u> , <u>1.6</u> 及び <u>2.0</u> g/cm <sup>2</sup>
地表面の放射能濃度	50 万 Bq/kg (500 Bq/g) *2

\*1 深さ d (g/cm<sup>2</sup>) における放射能濃度が  $\exp(-d/\beta)$  に比例する分布。ここで、緩衝深度βは、放射能濃度が地表面の 1/e (= 1/2.72) 倍になる深さを指す。

\*2 単位面積当たりの沈着密度 (Bq/cm<sup>2</sup>) = 緩衝深度 (g/cm<sup>2</sup>) × 表層の放射能濃度 (Bq/g)。なお、50 万 Bq/kg は高濃度汚染土壤に相当する。

表 2 試験に使用した作業服・手袋の仕様

	A	B	C	D	E	F
種別	作業服	作業服	雨合羽	軍手	軍手	ゴム手袋
寸法	10cm×10cm	10cm×10cm	10cm×10cm	原寸大	原寸大	原寸大
材質	ポリエステル	ポリエステル綿	ナイロン	ポリエステル 塩化ビニール (滑り止め)	ポリエステル	ゴム

表 3 付着試験に使用した土の特性\*1

名称	黒土		赤土		川砂	
	細粒分 まじり砂	細粒分 質砂	砂		礫まじり砂	
粒径分布						
2 mm 以上 (礫)	3.5%	3.6%	0.4%	0.7%	7.3%	8.7%
0.85~2 mm (粗砂)	13.2%	7.2%	8.1%	6.7%	18.7%	18.1%
0.25~0.85 mm (中砂)	44.3%	30.3%	67.2%	72.0%	59.4%	59.7%
0.075~0.25 mm (細砂)	28.3%	36.8%	19.8%	16.9%	13.9%	13.0%
0.075mm 以下 (シルト+粘土)	10.7%	22.1%	4.5%	3.7%	0.7%	0.5%
50%粒径 (mm)	0.36	0.20	0.34	0.38	0.51	0.54
自然含水比 (含水率) *2	63.1 (39%)	43.5 (30%)	24.0 (19%)	22.6 (18%)	11.6 (10%)	11.5 (10%)

\*1 それぞれの土壤試料からサンプルを二つ採取し分析した。

\*2 水と固体の質量をそれぞれ W, S とするとき、含水比は  $W/S \times 100$ 、含水率は  $W/(W+S) \times 100(\%)$  で表現される。

表 4 ピリング試験による土の付着密度 (試験布 A, 標本数 : 各 3 枚)

土の種類	黒土	黒土 (湿土)	赤土	川砂
含水率*1	40%	50%	20%	10%
付着密度(mg/cm <sup>2</sup> )	0.76 ± 0.06	11 ± 1.4	0.99 ± 0.07	0.93 ± 0.07

\*1 ハロゲン水分計で測定

表 5 動的荷重試験による土の付着密度 (カッコ内は標本数)

土の種類	含水率*1	付着密度 (mg/cm <sup>2</sup> )		
		試験布 A	試験布 B	試験布 C
黒土 (乾土)	<10%	2.3 ± 0.1 (3)	2.2 ± 0.2 (3)	0.57 ± 0.12 (3)
黒土 (生土)	約 36%	7.0 ± 2.4 (9)	6.4 ± 0.4 (9)	1.4 ± 0.3 (6)
黒土 (湿土) *2	約 47%	9.9 ± 2.2 (12)	12 ± 3.5 (12)	19 ± 2.0 (12)

\*1 乾土については自然乾燥させたときの質量変化から、湿土については生土の含水率をもとに追加した水の質量分を補正して算出した。

\*2 参考：同じ試験条件 (湿土) で、綿布では 12 ± 2.3 (6)、不織布 (タイベック) では 13 ± 7.7 (6) であった。

表 6 手袋への土の付着密度 (カッコ内は標本数)

土の種類	含水率*1	付着密度 (mg/cm <sup>2</sup> )		
		手袋 D	手袋 E	手袋 F
黒土 (乾土)	<10%	8.4 ± 0.7 (3)	12 ± 2.9 (3)	0.80 ± 0.23 (3)
黒土 (生土)	約 36%	11 ± 2.5 (6) *2	12 ± 1.4 (6)	0.46 ± 0.02 (6)
黒土 (湿土)	約 47%	29 ± 6.6 (12)	30 ± 1.4 (9)	31 ± 9.2 (9)

\*1 乾土については自然乾燥させたときの質量変化から、湿土については生土の含水率をもとに追加した水の質量分を補正して算出した。

\*2 参考：黒土 (生土) をふるいで粒径 0.85 mm 未満と 0.85 mm 以上に分け、手袋 D について同じ試験を行ったところ、付着密度はそれぞれ 8.6 ± 1.8 (3), 5.8 ± 1.0 (3) mg/cm<sup>2</sup> であった。小さな粒径で付着密度がやや大きくなる傾向が見られた。ただし、本試験は、表中に示したものは異なる時期に実施したものであり、含水率等の条件は同一ではない。

表 7 歩行試験による長靴への土の付着密度

(a) 歩数 : 5,000 歩

場所	条件	長靴	付着密度 (mg/cm <sup>2</sup> )				
			①	②	③	④	⑤
運動場	晴天時 *1	G	41 ± 1.5	22 ± 11	—	—	—
		H	8.6 ± 0.4	7.3 ± 0.9	—	—	—
		I	60 ± 12	42 ± 12	—	—	—
運動場	降雨後 *2	G	310 ± 20	130 ± 15 *11	—	—	—
		H	340 ± 17	98 ± 17 *11	—	—	—
		I	350 ± 7.7	190 ± 17 *11	—	—	—
公園	晴天時 *3	G	250 ± 13	180 ± 3.9	86 ± 3.8	—	—
		I	220 ± 24	150 ± 12	85 ± 16	—	—
公園	晴天時 *4	G	28 ± 5.1	20 ± 3.1	—	—	—
		I	25 ± 3.5	18 ± 4.2	—	—	—
公園	降雨後 *5	H	340 ± 28	120 ± 0.7	—	—	—
		I	710 ± 63	280 ± 64	—	—	—
公園	降雨後 *6	H	650 ± 42	470 ± 62	310 ± 83	76 ± 13	15 ± 8.3
		I	360 ± 41	210 ± 49	140 ± 37	39 ± 16	18 ± 11
公園	降雨後 *7	G	380 ± 0.5	200 ± 15	120 ± 13	—	35 ± 5.1 *12
		I	500 ± 44	250 ± 21	160 ± 18	—	59 ± 1.0 *12
荒地 (砂)	降雨後 *5	H	5.9 ± 0.1	3.5 ± 0.6	—	—	—
		I	59 ± 1.0	13 ± 4.4	—	—	—
畑	晴天時 *8	G	210 ± 4.2	21 ± 0.8	—	—	—
		G	200 ± 8.9	10 ± 1.3	—	—	—
		I	140 ± 6.1	5.0 ± 4.0	—	—	—
		I	200 ± 0.6	8.3 ± 0.1	—	—	—
畑	降雨後 *9	G	2300 ± 140	970 ± 55	540 ± 15	150 ± 31	17 ± 4.5
		G	2400 ± 32	670 ± 57	370 ± 42	220 ± 11	56 ± 18
		I	3100 ± 180	500 ± 30	300 ± 22	32 ± 4.0	7.0 ± 0.1
		I	2700 ± 200	1100 ± 150	500 ± 4.5	200 ± 90	33 ± 12
畑	降雨後 *10	H	120 ± 26	100 ± 32	—	—	—
		I	190 ± 31	81 ± 23	—	—	—

\*1 曇時々晴：試験の 5～6 日前に降雨（二日間の合計降水量 15.5 mm），それ以降の降雨なし。

\*2 曇時々雨（歩行中は曇）：試験当日及び前日に降雨（降水量はそれぞれ 80.0 mm，41.5 mm）。

\*3 快晴：試験の 7 日前に降雨（降水量 12.5 mm），それ以降の降雨なし。

\*4 曇：試験の 9 日前に降雨（降水量 12.5 mm），それ以降の降雨なし。

\*5 晴時々曇：試験の前日に降雨（降水量 43.5 mm）。

\*6 晴：試験の前日に降雨（降水量 12.5 mm）。

\*7 晴：試験の前日に降雨（降水量 13.5 mm）。

\*8 晴：試験の 5 日前に降雨（降水量 12.5 mm），それ以降の降雨なし。

\*9 快晴：試験の前日に降雨（降水量 12.5 mm）。

\*10 晴：試験の 2～3 日前に降雨（二日間の合計降水量 35.5 mm），それ以降の降雨なし。

\*11 同じ長靴で晴天時（7 日後）に同じ場所を歩行したところ，付着密度は，長靴 G，H，及び I についてそれぞれ 9.2 ± 2.3，13 ± 4.4，27 ± 15 mg/cm<sup>2</sup>に下がった。

\*12 同じ長靴で，7 日後に，②の動作を再実施したところ，付着密度は，長靴 G 及び I についてそれぞれ 9.2 ± 1.1，16 ± 2.0 mg/cm<sup>2</sup>に下がった。

表 7 (続き)  
(b) 歩数 : 500 歩

場所	条件	長靴	付着密度 (mg/cm <sup>2</sup> )				
			①	②	③	④	⑤
運動場	晴天時 *1	H	8.3 ± 7.3	3.7 ± 1.9	—	—	—
		I	23 ± 5.1	15 ± 3.8	—	—	—
運動場	降雨後 *2	H	280 ± 27	100 ± 13 *5	—	—	—
		I	230 ± 40	78 ± 37 *5	—	—	—
畑	晴天時 *3	G	150 ± 56	10 ± 2.7	—	—	—
		G	93 ± 13	3.8 ± 0.2	—	—	—
		I	110 ± 15	4.9 ± 1.6	—	—	—
		I	140 ± 1.8	4.2 ± 1.2	—	—	—
畑	降雨後 *4	G	2800 ± 410	580 ± 110	280 ± 63	150 ± 42	37 ± 17
		G	3500 ± 19	640 ± 210	320 ± 98	190 ± 87	50 ± 45
		I	3900 ± 90	450 ± 110	310 ± 72	44 ± 9.0	4.7 ± 4.1
		I	2000 ± 89	790 ± 120	260 ± 20	150 ± 25	58 ± 17

\*1 曇時々晴 : 試験の 5~6 日前に降雨 (二日間の合計降水量 15.5 mm), それ以降の降雨なし。

\*2 曇時々雨 (歩行中は曇) : 試験当日及び前日に降雨 (降水量はそれぞれ 80.0 mm, 41.5 mm)。

\*3 晴 : 試験の 5 日前に降雨 (降水量 12.5 mm), それ以降の降雨なし。

\*4 快晴 : 試験の前日に降雨 (降水量 12.5 mm)。

\*5 同じ長靴で晴天時 (7 日後) に同じ場所を歩行したところ, 付着密度は, 長靴 H 及び I についてそれぞれ  $6.6 \pm 1.6$ ,  $10 \pm 4.9$  mg/cm<sup>2</sup> に下がった。

表 8 除染作業（1 日間）に従事した者が着用した作業服，手袋，及び長靴から観測された放射能，表面密度，及び土壌中放射能濃度

	主たる 作業	放射能(Bq)			表面密度(Bq/cm <sup>2</sup> )			土壌中濃 度(Bq/g)
		作業服*1	手袋*2	長靴	作業服*3	手袋	長靴	
1	農地除染	7.2 ± 0.9	1.6 ± 0.4	170 ± 3	0.072	0.005	0.41	14 (平均)
2		14 ± 1	5.9 ± 0.6	540 ± 19	0.14	0.019	1.3	
3		3.0 ± 0.6	3.6 ± 0.5	2050 ± 37	0.030	0.011	5.1	
4		51 ± 2	5.6 ± 0.6	1100 ± 26	0.51	0.018	2.8	
5		19 ± 1	7.4 ± 0.6	1500 ± 29	0.19	0.023	3.8	
6	宅地除染	22 ± 2	2.6 ± 0.5	25 ± 2	0.22	0.008	0.063	9.2 (平均)
7		41 ± 2	9.4 ± 1.0	420 ± 15	0.41	0.029	1.1	
8		31 ± 2	3.0 ± 0.5	260 ± 12	0.31	0.009	0.65	
9		190 ± 8	24 ± 1.0	88 ± 6	1.9	0.076	0.22	
10		33 ± 2	5.1 ± 0.6	360 ± 15	0.33	0.016	0.91	
11	仮置き場 建設	12 ± 1	1.5 ± 0.4	100 ± 8	0.12	0.005	0.26	5.0 (平均)
12		15 ± 1	3.1 ± 0.5	57 ± 4	0.15	0.010	0.14	
13		15 ± 1	1.1 ± 0.3	23 ± 1	0.15	0.003	0.057	
14		11 ± 1	2.1 ± 0.4	250 ± 12	0.11	0.006	0.61	
15		12 ± 1	2.0 ± 0.5	120 ± 7	0.12	0.006	0.30	

\*1 作業員一人当たり，指定されたサイズの作業服（上下）を天候不良等に備えた替えを含め二着用した。表中の放射能は実際に使用された作業服について合計した値である。

\*2 作業員一人当たり，綿手袋とゴム手袋それぞれ 2～3 双が使用された。表中の放射能はそれらの合計放射能である。なお，綿手袋とゴム手袋の放射能の比は 1：4 であった。

\*3 接触面積 100 cm<sup>2</sup> (= 10 cm × 10 cm) を仮定。