

各種土質材料の放射線遮蔽性能に関する実験的研究

○那須郁香<sup>1</sup>・吉川絵麻<sup>1</sup>・小峯秀雄<sup>1</sup>・後藤茂<sup>1</sup>  
新井靖典<sup>2</sup>・氏家伸介<sup>3</sup>・吉村貢<sup>4</sup>

<sup>1</sup>早稲田大学大学院 創造理工学研究科・<sup>2</sup>西武建設株式会社・<sup>3</sup>株式会社ホージュン・  
<sup>4</sup>ソイルアンドロックエンジニアリング株式会社

1. はじめに

2011年3月11日に起こった福島第一原子力発電所事故により、事故由来放射性物質に汚染された瓦礫類が復旧工事等で発生している。表面線量率 1 mSv/h ~ 30 mSv/h 程度の瓦礫類は一定期間覆土式一時保管施設に保管されることが予定されている<sup>1)</sup>。また、福島県内に生じ、仮置場に一時保管された放射性物質汚染土壌は、中間貯蔵施設に最大 30 年、最終処分場に埋設の手順での処理・処分が計画されている。土壌貯蔵物の放射性セシウム濃度は 8,000 Bq/kg~100,000 Bq/kg が予定され、福島県の大熊町と双葉町に集約されることが決定している<sup>2)</sup>。覆土式一時保管施設の覆土には、瓦礫類から放出される放射線を遮蔽し周辺環境への影響を低減することが期待されており、中間貯蔵施設の覆土には、除去土壌からの直接ガンマ線及びスカイシャインガンマ線による工事用地周辺の放射線量を十分に低減できる遮蔽構造であることが要求されている。加えて、安価で容易に手に入ることから、将来応急処置的な遮蔽材として土質材料を使用する可能性があり、ガンマ線および燃料デブリから放出される中性子線を考慮する必要がある。これらをふまえ、著者らは覆土材のガンマ線および中性子線の遮蔽性能を定量的に評価することが重要であると考えた。土質材料の放射線遮蔽性能については、既往の研究よりガンマ線の遮蔽は土質材料の湿潤密度に依存し、中性子線の遮蔽は土質材料の体積含水率に依存することが明らかにされている<sup>3)</sup>。本研究では、土質区分の違いから、各土質材料のガンマ線の遮蔽性能を評価した。また、建設発生土として採取される関東ロームを、自然含水比が高い状態で存在することから中性子線の遮蔽に効果的と考え、ガンマ線および中性子線の放射線遮蔽実験を実施した。

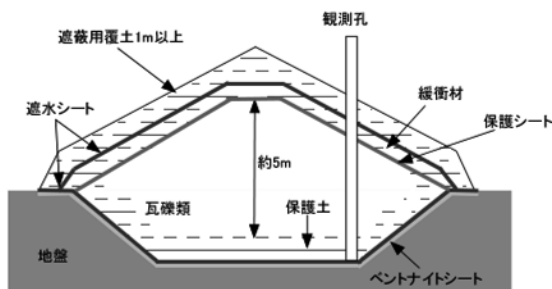


図-1 覆土式一時保管施設<sup>1)</sup>

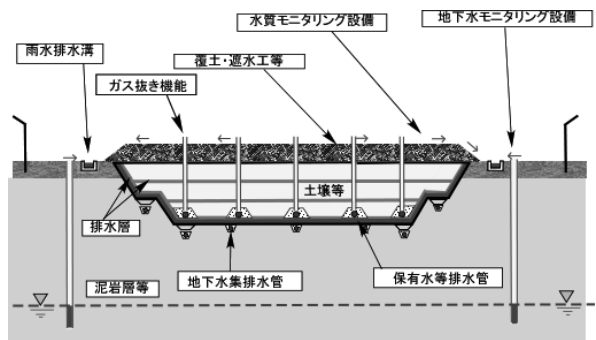


図-2 中間貯蔵施設(Ⅱ型A)の概要図<sup>2)</sup>

2. 使用した土質材料及びその特性

2.1 使用した土質材料

本研究では、非塑性シルトの DL クレー(昭和 KDE 株式会社製)、粘性土のクレーサンド (株式会社タック製)、火山灰質粘性土の関東ロームとして所沢地区の関東ローム、焼成品の「関東ローム 7 種」、「関東ローム 11 種」、砂質土の東北珪砂 5 号を使用した。以下所沢地区の関東ロームを所沢ロームとする。表-1 にそれぞれ土質材料の基本的性質を示す。

表-1 使用した土質試料の基本的性質

土質材料名	土質区分	土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	液性限界 $w_L(\%)$	塑性限界 $w_p(\%)$	自然含水比 $w(\%)$
DL クレー	非塑性シルト質土	2.62	NP	NP	0
クレーサンド	粘性土	2.60	50.1	26.9	5.6
所沢ローム	火山灰質粘性土	2.95	126.2	83.4	111.7
関東ローム 7 種, 11 種 (焼成品)	火山灰質粘性土	2.90	NP	NP	0
東北珪砂 5 号	砂質土	2.62	NP	NP	0

An experimental study on radiation shielding properties with soil

Ayaka Nasu<sup>1</sup>, Ema Yoshikawa<sup>1</sup>, Hideo Komine<sup>1</sup>, Shigeru Goto<sup>1</sup>, Yasunori Arai<sup>2</sup>, Shinsuke Uziie<sup>3</sup>, Mitsugu Yoshimura<sup>4</sup> (<sup>1</sup>Waseda University, <sup>2</sup>Seibu Construction Co., <sup>3</sup>Co. HOJUN, <sup>4</sup>Soil and Rock Engineering Co.)

**KEY WORDS:** Kanto loam, Volcanic ash deposit, Waste, Radiation shielding

## 2.2 関東ローム

関東ロームは富士山や箱根山が噴出源の火山灰が堆積し風化したことにより生成され、関東地方の広範囲に分布する火山灰質粘性土である。他の土質と比較して特異な点は、自然状態で80~150%と高含水比な点である。土粒子の骨格構造は、粘土鉱物である非晶質のアロフェンやその集合体によって蜂の巣構造を有しており、内部に非自由水を保持していると考えられる。非自由水が逸散すると、骨格内に水分を保持する能力の低下を引き起こすことから、加水を行なっても全く異なった土として考えられる<sup>4)</sup>。また、掘削等の外力が働くことで骨格構造が乱され強度低下を招くことが知られており、実施工においては、トラフィカビリティを確保するために「ブルドーザ」によってゆるく転圧することが有効と考えられている。

本研究では、所沢地区で採取したローカル土である所沢ロームの他に、焼成品としてJIS Z 8901の「試験用粉体及び試験用粒子」に規定されるJIS 試験用粉体1の「関東ローム7種」と「関東ローム11種」を使用した。関東ローム7種、11種は、800℃にて焼成された後、それぞれ粒径0.075 mm以下が約80%、0.006 mm以下が約90%となるよう粒度調整されている<sup>5)</sup>。

## 3. 放射線遮蔽実験の実施

### 3.1 試験装置

図-3に放射線遮蔽実験の概要を示す。ガンマ線の線源に<sup>137</sup>Cs(ガンマ線エネルギー：0.66 MeV)を、中性子線の線源には<sup>252</sup>Cf(平均エネルギー：2.3 MeV)を使用した。線源と検出器の測定間隔は500 mmとし、断面が300 mm×300 mmの土質供試体を線源側に設置した。このとき検出器に向かって層厚を変化させた。測定する放射線の種類と使用した検出器を表-2に示す。中性子線は、全エネルギー領域の「全中性子線」、数MeVと高エネルギー状態である「速中性子線」、約0.025 eVと低エネルギー状態である「熱中性子線」の3つの区分に分けて測定した。

### 3.2 供試体の作製と実験の条件

表-3に各土質材料の実験条件を示す。試料の状態から自立可能、自立困難とみなしたものをそれぞれa)自立供試体、b)アクリル容器に充填の2種類の方法で作製した。自立可能とみなしたクレーサンド、所沢ロームは、突き固め用の型枠(内寸：300 mm×300 mm×500 mm)を用いて、目標湿潤密度になるように突き固めた。自立困難とみなしたDLクレー、関東ローム7種、11種、東北珪砂5号は、アクリル容器(内寸：300 mm×100 mm×300 mm、材料厚さ：10 mm)に充填させた。DLクレー、クレーサンド、関東ローム7種、11種、東北珪砂5号は加水により設定した含水比に調整した。一方、所沢ロームは室内乾燥により含水比調整を行なった。その後、それぞれ目標湿潤密度に締めめまたは充填

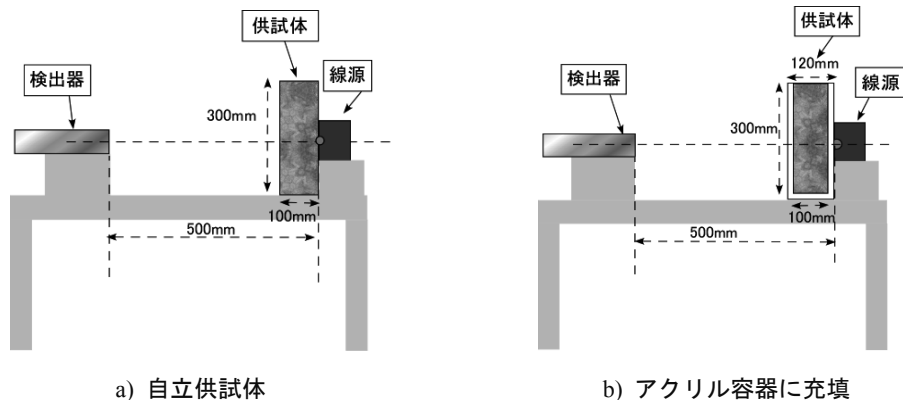


図-3 放射線遮蔽実験の概要図

表-2 放射線の種類と使用した検出器

検出する放射線	サーバイメータ	検出器	測定範囲
ガンマ線	TCS-172B (アロカ製)	NaI シンチレーション	B.G. ~ 30 μSv/h
全中性子線	TPS-451C (アロカ製)	<sup>3</sup> He 比例計数管	0.01 ~ 10,000 μSv/h
速中性子線	ANDES (SRE 製)	<sup>3</sup> He 比例計数管	0 ~ 655310 cpm
熱中性子線	WARP (SRE 製)	<sup>3</sup> He 比例計数管	0 ~ 655310 cpm

し、実際の湿潤密度は表-3 に示したとおりである。層厚 10 cm, 20 cm と変化させる際は、それぞれ下記のように行なった。自立供試体は 20 cm に突き固めて放射線を透過した後、その場で供試体を切断し 10 cm に成形した。アクリル容器を使用した層厚 20 cm の供試体は、試料を充填したアクリル容器を 2 つ、層厚 10 cm の供試体はアクリル容器を 1 つ設置した。

表-3 各土質材料の実験条件<sup>6)</sup>

土質材料		含水比 w (%)	湿潤密度 $\rho_t$ (g/cm <sup>3</sup> )	層厚 t (cm)
DL クレー(吉川, 2015 年)	アクリル容器	30	1.92	10,20
クレーサンド(吉川, 2015 年)	自立供試体	30	1.70	10,20
所沢ローム	自立供試体	111	1.36	10,20
	自立供試体	97	1.35	10,20
	自立供試体	72	1.27	10,20
関東ローム 7種(吉川, 2015 年)	アクリル容器	0(自然)	0.95	10
	アクリル容器	30	1.23	10
関東ローム 11種(吉川, 2015 年)	アクリル容器	0(自然)	0.68	10
	アクリル容器	30	1.21	10
東北珪砂 5号(吉川, 2015 年)	アクリル容器	0(自然)	1.69	10,20
	アクリル容器	13.9(飽和)	2.01	10,20
東北珪砂 5号(2016 年)	アクリル容器	0(自然)	1.69	10,20
	アクリル容器	19.9(飽和)	2.03	10,20

### 3.3 実験結果の整理方法

土質材料による放射線透過線量の低減量と低減の割合はそれぞれ式(1), 式(2)より算出した。ここで低減の割合を低減率とする。また、アクリル容器の影響を考慮した場合、放射線の低減量と低減率は式(1)', 式(2)'より算出した。

ここに、 $\Delta N$  : 放射線低減量,  $N$  : 供試体ありの放射線透過量,  $N_0$  : 供試体なしの放射線透過線量,  $N_{acryl}$  : 空アクリル容器のみの放射線透過線量,  $R_{rad}$  : 放射線低減率,  $N_{BG}$  : 自然環境のバックグラウンド値とする。

$$\Delta N = N_0 - N \quad \dots \text{式(1)} \qquad \Delta N = N_{acryl} - N \quad \dots \text{式(1)'}$$

$$R_{rad} = \frac{\Delta N}{N_0 - N_{BG}} \quad \dots \text{式(2)} \qquad R_{rad} = \frac{\Delta N}{N_{acryl} - N_{BG}} \quad \dots \text{式(2)'}$$

吉川ら<sup>6)</sup> や齋藤ら<sup>7)</sup>によりガンマ線の低減は土質材料の湿潤密度に依存することが明らかにされている。ここでは、湿潤密度と層厚の積を総透過密度とし、ガンマ線低減率を総透過密度により評価することとする。式(3)より総透過密度を算出した。ここに、 $\Sigma\rho$  : 総透過密度(g/cm<sup>2</sup>)、 $\rho_t$  : 土質材料の湿潤密度(g/cm<sup>3</sup>)、 $t$  : 層厚(cm)とする。

また、土質材料の水分量が大きいほど中性子線を低減することが明らかにされている<sup>6)</sup>。これより、土質材料の含水比と体積含水率により評価した。体積含水率は式(4)を使って算出した。

$$\Sigma\rho = \rho_t \times t \quad \dots \text{式(3)}$$

$$\theta = \frac{V_w}{V} \times 100$$

$$= \frac{\rho_t}{\rho_w} \times \frac{w}{100 + w} \times 100 \quad \dots \text{式(4)}$$

## 4. 放射線遮蔽実験による各土質材料の放射線遮蔽性能の評価

### 4.1 層厚による各放射線遮蔽性能の変化

図-4 に各土質材料における層厚と各放射線の低減率の関係を示す。放射線の種類は、(a)ガンマ線、(b)全中性子線、(c)速中性子線、(d)熱中性子線である。供試体は断面積が 300 mm×300 mm であり、層厚が等しいとき同体積の試料に対しての放射線の低減率を表している。

図 4 より、ガンマ線は、層厚の増加に伴い低減率が大きくなる傾向が見られた。低減率の分量は土質材料毎に異なっており、ガンマ線低減率は層厚 10 cm で 20~60%、層厚 20 cm で 65~85%に分布した。中性子線については、全中性子線、

速中性子線で、層厚の増加に伴い低減率が大きくなる傾向が見られ、全中性子線低減率は層厚 10 cm で 15~75 %、層厚 20 cm で 60~95 % に分布し、速中性子線低減率は層厚 10 cm で 15~75 %、層厚 20 cm で 55~95 % に分布した。一方、熱中性子線は、層厚 10 cm で低減率が -45~15 % に分布し、多くの土質材料で負の値となり、層厚 20 cm では 20~70 % の範囲に分布した。ただし、関東ローム 7 種と 11 種 ( $w=0\%$ )、東北珪砂 5 号(自然)・2015 は層厚 10 cm は、熱中性子線低減率が正の値であり、この 3 種についてはほぼ絶乾状態である点が共通している。東北珪砂 5 号(自然)・2016 は負の値を示したことから、絶乾状態の土質材料の熱中性子線低減率について、再現性の確認が必要である。層厚 10 cm で以上の結果より、土質材料の種類によって差はあるものの、層厚の増加はガンマ線、全中性子線、速中性子線の透過線量の低減に効果があることを確認した。熱中性子線についても、層厚 10 cm で絶乾状態のいくつかの土質材料を除き、低減率が負の値を示したが、層厚 20 cm では低減されたことから、層厚の増加は熱中性子線の低減に効果があると言える。

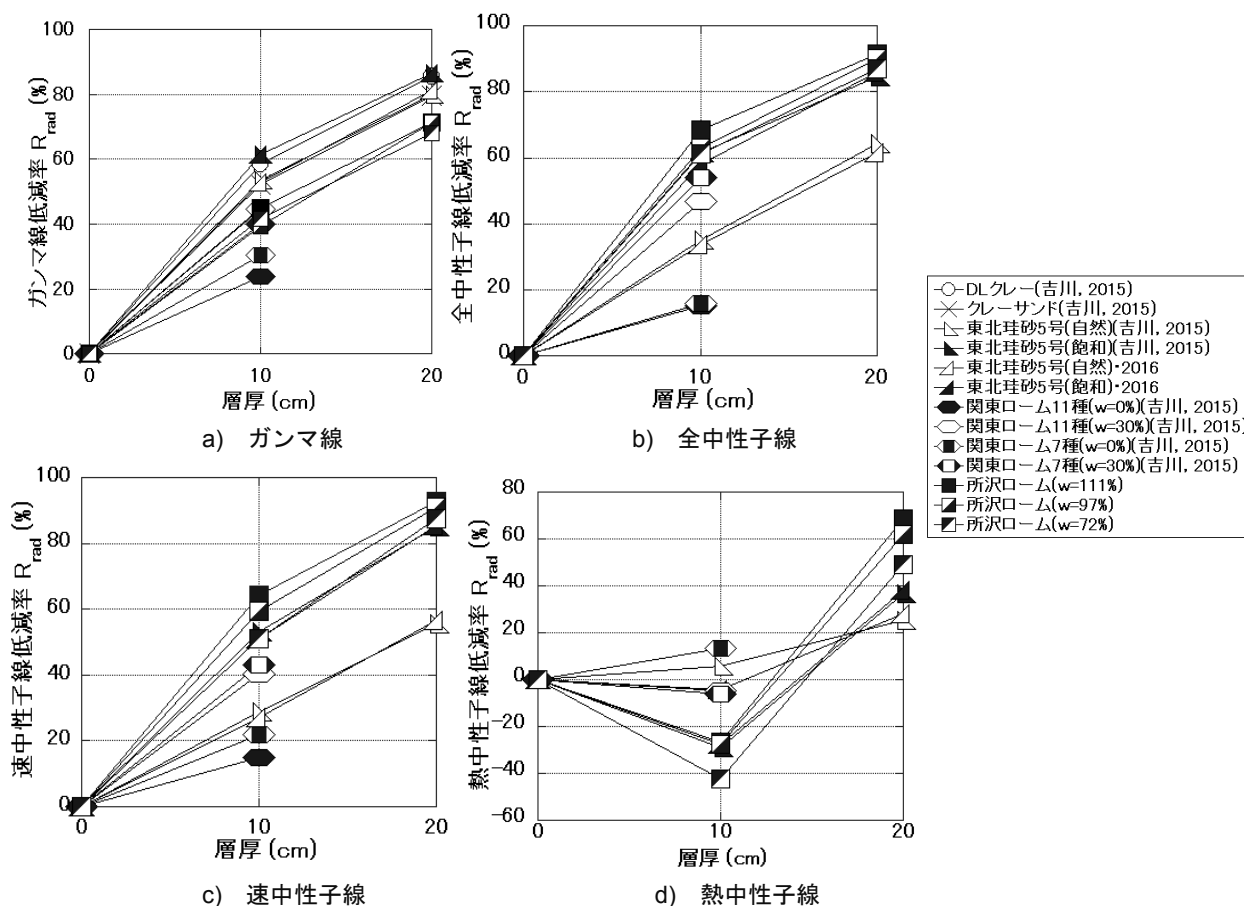


図-4 層厚と各放射線低減率の関係

#### 4.2 湿潤密度および総透過密度によるガンマ線遮蔽性能の評価

電磁波の一種であるガンマ線の遮蔽は、土質材料によるガンマ線のエネルギー減衰によって成り立つ。土質材料については湿潤密度に依存するという既往の研究が得られている。図-5に湿潤密度とガンマ線低減率の関係を示し、図-5a)に供試体層厚 10 cm、図-5b)に供試体層厚 20 cm のときを示した。

図より、層厚 10 cm、20 cm のどちらの条件においても、湿潤密度の増加に伴いガンマ線低減率が線形的に増加したことが明らかとなった。層厚 10 cm において、ガンマ線低減率はおよそ 20 ~60 % に分布した。関東ローム 7 種と 11 種では、含水比 0 % 時に湿潤密度が  $1.0 \text{ g/cm}^3$  より小さいことから、ガンマ線低減率が 30 % 前後となり、他の条件に比べ比較的低い結果となった。関東ローム 7 種、11 種に加水し含水比 30 % となると、所沢ロームとほぼ同じ湿潤密度となったため、ガンマ線低減率が所沢ロームとほぼ同様の約 40 % を示した。所沢ロームは含水比 72~111 % の範囲では、湿潤密度は  $1.27 \sim 1.36 \text{ g/cm}^3$  の範囲にあり、含水比の増加に伴い湿潤密度が増加したが、含水比 97 %、 $\rho_t=1.35 \text{ g/cm}^3$  においてガンマ線低減率が最も小さく、湿潤密度の大小に依存しない結果となった。このことから、層厚 10 cm において湿潤密度  $1.27 \sim 1.36 \text{ g/cm}^3$  の範囲は、ガンマ線低減率に明確な差異が生じる程の違いとはならなかったと考えられる。また、自然状態の東北珪砂 5 号とクレ-サンドは湿潤密度が約  $1.7 \text{ g/cm}^3$  となり、ガンマ線低減率はおよそ 55 % であった。DL クレ-と飽和状態の東北珪砂 5 号は湿潤密度が約  $2.1 \text{ g/cm}^3$  となり、ガンマ線低減率はおよそ 60 % であった。

層厚 20 cm において、ガンマ線低減率はおよそ 70~85 % に分布した。所沢ロームのガンマ線低減率は約 70 % であり、含水比 111 % と 97 % の湿潤密度はそれぞれ 1.36 g/cm<sup>3</sup> と 1.35 g/cm<sup>3</sup> であったため、低減率はほぼ等しくなった。また、自然状態の東北珪砂 5 号とクレーサンドのガンマ線低減率は 80 %、DL クレーと飽和状態の東北珪砂 5 号のガンマ線低減率は約 85 % となった。

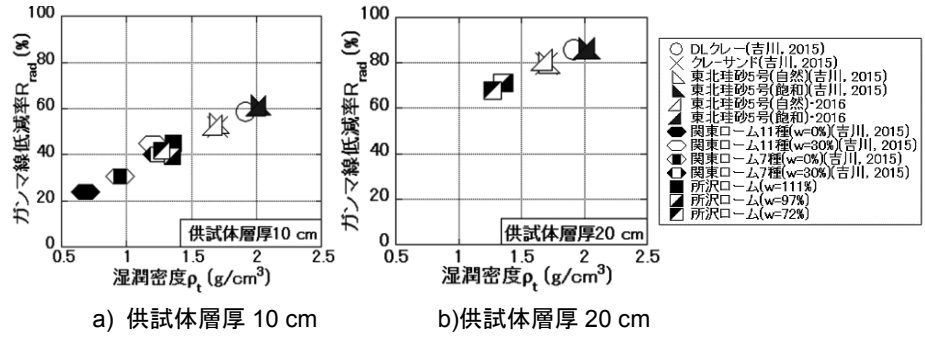


図-5 湿潤密度とガンマ線低減率の関係

図-6 に総透過密度とガンマ線低減率の関係を示す。総透過密度が増加するのに従って、ガンマ線低減率が増加し、 $R_{rad}=100\%$  に近似するような傾向が確認された。また、層厚 10 cm の方が層厚 20 cm よりもガンマ線低減率の増加傾向は急であった。つまり、供試体の湿潤密度が大きいほど、層厚が大きいほど、ガンマ線の低減に効果的であるという結果となった。これらの結果は、ガンマ線が土質材料中の電子に入射してエネルギーが減衰されるというメカニズムに基づく。湿潤密度が大きいほど、ガンマ線の飛程空間における電子の存在度は大きくなる。また、層厚が増加するほど、ガンマ線が飛程中に電子に入射しエネルギー減衰する回数が増加する。このことから土質材料は、湿潤密度が大きいほど、また層厚が大きいほどガンマ線の低減に効果的であると言える。また、本実験結果からは、土質区分が異なった場合でも層厚が等しいとき、湿潤密度が同程度であればガンマ線低減率がほぼ等しい結果が確認された。

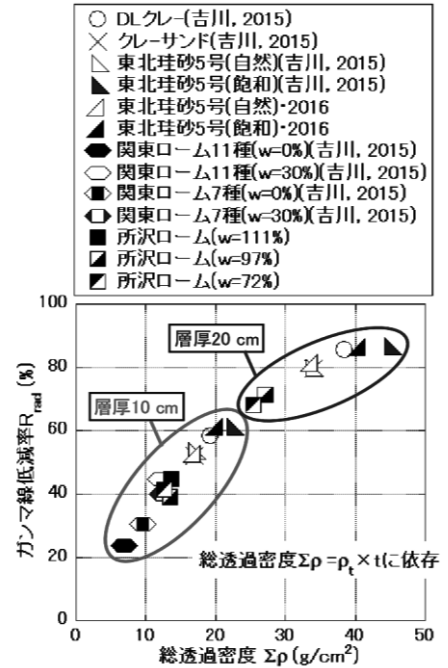
### 5. 層厚 10 cm における関東ローム 7 種、11 種と所沢ロームの各中性子線遮蔽性能の評価

図-7~図-9 に、層厚 10 cm における焼成品の関東ローム 7 種、11 種と所沢ロームの体積含水率と全中性子線、速中性子線、熱中性子線の低減率の関係を示す。加えて、中性子線の減速材として用いられる水道水を層厚 10 cm で放射線遮蔽実験を行った結果を図中に示した。ただし、この値はアクリル容器に水道水を投入して中性子線を透過し、式(1)、式(2)より算出したものである。

図-7 と図-8 より、層厚 10 cm における関東ロームの全中性子線および速中性子線の低減率は、体積含水率 0~30 % と 30 % 以上で低減率の増加傾向が異なり、前者では中性子線の遮蔽に効果的な水が加えられたために急激に低減率が増加し、後者では比較的緩やかに増加した。体積含水率 0 % において、全中性子線低減率は約 15 %、速中性子線低減率は 15~25 % の範囲にあり、土中に水分がない状態では中性子線の遮蔽効果が低いことが分かった。含水比を 30 % に調整した関東ローム 7 種、11 種は全中性子線低減率が約 50 %、速中性子線低減率は約 40 % 低減しており、7 種のほうが 11 種より若干低減率が大きかった。これは、粒径の違いによる土粒子と土中水の存在状況によって中性子線の低減量が異なる可能性があると考えられる。水道水の低減率に対しては、全中性子線が約 19~67 %、速中性子線が約 19~54 % に相当する低減率を示した。また、所沢ロームは自然状態が高含水比であるため体積含水率が大きく、全中性子線低減率は 60~70 % に分布し、速中性子線低減率は 50~65 % に分布した。水道水の低減率に対しては、それぞれ約 76~85 %、約 64~81 % に相当することが確認できた。

また、図-9 より、体積含水率 0 % から増加すると熱中性子線低減率は負の方向へ減少し、体積含水率 53.2 % の所沢ローム(w=72 %) で最小値をとった。その後、体積含水率が増加するに従って増加傾向を示した。体積含水率 53.2 % の所沢ローム(w=72 %) は、低減量  $\Delta N$  が -363 cpm であり、供試体を設置せず線源のみで測定した熱中性子線透過線量より増加した結果となった。このことから、層厚 10 cm では体積含水率の増加に伴って、熱中性子線の透過線量が増加したことが明らかとなった。原因としては、土中水の増加に伴いエネルギーの高い速中性子線が熱中性子線のエネルギーレベルに減衰される現象が多く発生したことにより、速中性子線由来の熱中性子線が増加したことが考えられる。また、体積含水率 53.2 % (含水比 72 %) 以上においては、速中性子線由来の熱中性子線の低減が行なわれたと考えられる。

本研究では、含水比で求められる精度で土中水を評価したが、関東ロームはその骨格構造から非自由水を多く持つ。このため、強熱減量試験等で非自由水の評価を行い、中性子線の低減への影響を確認する必要がある。



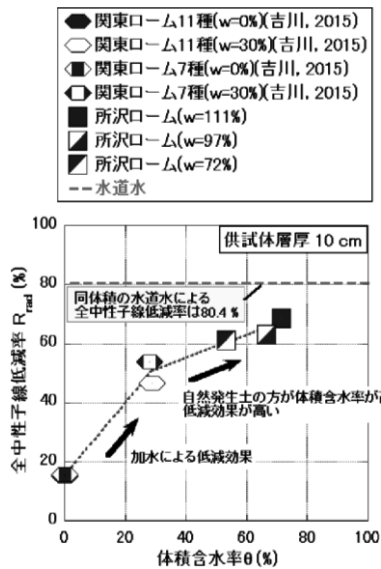


図-7 層厚 10 cm における  
関東ロームの体積含水率と  
全中性子線低減率の関係

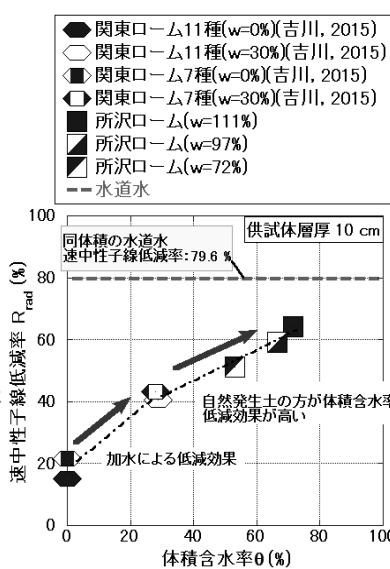


図-8 層厚 10 cm における  
関東ロームの体積含水率と  
速中性子線低減率の関係

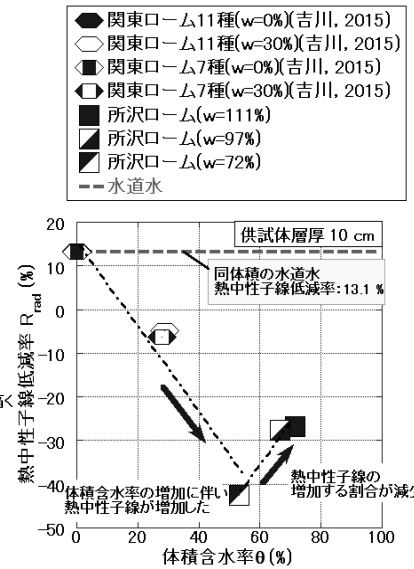


図-9 層厚 10 cm における  
関東ロームの体積含水率と  
熱中性子線低減率の関係

## 6. 結論

本研究では粘性土、非塑性シルト質土、砂質土、火山灰質粘性土として、それぞれクレーサンド、DL クレー、関東ローム(所沢ローム、関東ローム 7 種、11 種)、東北珪砂 5 号に対して層厚を 10 cm、20 cm に変化させてガンマ線を透過した。また、関東ロームを層厚 10 cm において中性子線を透過した。各放射線の低減率を算出して層厚、総透過密度、体積含水率によって評価し、得られた知見を下記に記す。

- 1) 層厚を増加させると、ガンマ線、全中性子線、速中性子線の低減率が増加した。熱中性子線は、多数の試料で層厚 10 cm において低減率が負の値を示し、層厚 20 cm において低減率が 20~70 %まで増加するという傾向を示した。
- 2) ガンマ線低減率は、層厚 10 cm、20 cm で湿潤密度の増加に伴い線形的な増加傾向を示した。また、層厚と湿潤密度の積である総透過密度の増加に伴い、 $R_{rad}=100\%$  に近似するような増加傾向を示した。
- 3) 層厚 10 cm において、関東ローム 7 種、11 種は全中性子線、速中性子線の低減率が加水によって急激に増加した。同体積の水道水に対して、関東ローム 7 種、11 種は、全中性子線が約 19~67%、速中性子線が約 19~54%に相当する低減率を示し、所沢ロームは全中性子線が約 76~85%、速中性子線が約 64~81%に相当する低減率を示した。
- 4) 熱中性子線については低減率が減少し、体積含水率が増加するほど熱中性子線の透過線量が増加する結果となった。これは、土中水の増加にともないエネルギーの高い速中性子線が、熱中性子線のエネルギーレベルに減衰されたために、速中性子線由来の熱中性子線が増加したと考えられる。

謝辞：本研究の一部は、文部科学省「英知を結集した原子力科学技術・人材育成推進事業 廃止措置研究・人材育成等強化プログラム」の採択課題「福島第一原子力発電所構内環境評価・デブリ取出しから廃炉までを想定した地盤工学的の新技術開発と人材育成プログラム（地盤工学会）」の支援により得られたものです。ここに感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 東京電力株式会社：福島第一原子力発電所覆土式一時保管施設の増設について、2013。
- 2) 環境省、中間貯蔵施設等福島現地推進本部：除去土壌等の中間貯蔵施設の案について、pp.28-34、H26.5。
- 3) 吉川絵麻・小峯秀雄・後藤茂・氏家伸介・成島誠一・長江泰史・吉村貢：放射線遮蔽性能を有する超重泥水の透過厚さによる線量低減効果の評価、第 51 回地盤工学研究発表会、pp.2167-2168、2016.9。
- 4) 西堀高弘：関東ロームの物理的性質について、愛知工業大学研究報告 6、pp.269-278、1971
- 5) (一社)日本粉体工業技術協会：JIS Z 8901 試験用粉体 1 説明書、pp.1-20、2014。
- 6) 吉川絵麻・小峯秀雄・後藤茂・吉村貢・鈴木聡彦・成島誠一・新井靖典・氏家伸介・佐古田又規・長江泰史：土質系材料の放射線遮蔽性能の定量評価、土木学会論文集(地圏工学 C)、(投稿中)
- 7) 齋藤祐磨・小峯秀雄・成島誠一・新井靖典・水野正之・氏家伸介・佐古田又規・吉村貢・鈴木聡彦・井上恵介・後藤茂：福島第一原子力発電所の燃料デブリ取り出し・事故由来廃棄物を想定した重泥水・土質材料の放射線遮蔽効果の評価、第 11 回環境地盤工学シンポジウム 発表論文集、pp.483-488、2015 年 7 月