

放射性セシウムで汚染された廃棄物を対象とした海面処分場 に用いる遮水地盤材料に関する研究

Study on Seepage Control Geo-Material of Coastal Disposal Facilities
for Waste Contaminated by Radioactive Cesium

村上博紀 Hiroki MURAKAMI (広島大学大学院工学研究科)
土田 孝 Takashi TSUCHIDA (広島大学大学院工学研究科)
安部太紀 Taiki ABE (元広島大学大学院工学研究科)

2011年3月11日に発生した東日本大震災とその直後に発生した福島第一原発事故により、莫大な量の放射性セシウムで汚染された廃棄物が発生した。本研究では、このような廃棄物を対象とした海面処分場に用いる遮水地盤材料(以後、遮水材料)の可能性を調べるため、遮水材料の目標性能を設定し、海成粘土にベントナイトを混合した試験体に対して遮水性能及び吸着性能の検討を行った。遮水性能については段階載荷圧密試験を、吸着性能については試験体と安定セシウム溶液を混合させ攪拌させる振とう攪拌試験(バッチ試験)を行うことにより評価した。試験結果より、本研究で設定した遮水性能及び吸着性能の目標は達成されなかった。

キーワード：海成粘土，ベントナイト，放射性セシウム (IGC：D-05, D-10, D-04)

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震と津波によって発生した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広範囲の地域において放射性セシウムで汚染された災害廃棄物が大量に発生した。放射性セシウムによる汚染というこれまでに例のない廃棄物であるため、通常の廃棄物処分場での処分が進まず、依然として各地で野積みされた状態になっている。さらに、除染によって発生する表土や、廃棄物の焼却灰、下水処理場や河川底質に集積した汚染度の高い汚泥も、処分が進まずに保管せざるを得ない場合が多く、復興を進める上で大きな障害となっている。これらの廃棄物の発生量は福島・宮城両県だけで2,800万 m^3 とも推定されているが、今後復興事業や除染の進展によりさらに増加する可能性がある。

関東大震災や阪神淡路大震災など、わが国が過去に経験した大震災からの復興において、海面を利用した災害廃棄物の処分がなされてきた。関東大震災の震災ガレキは東京港豊洲地区の埋立、横浜港山下公園の埋立に利用された。また、阪神大震災によって発生したガレキは2,000万トンに達し処分場の確保が問題となったが、震災直後に大阪湾広域臨海環境整備センターが臨海部に計1,500万 m^3 分の処分地を提供したこと、迅速に港湾計画を改訂して神戸港内に450haの災害ガレキ埋立用地が確保されたことにより、比較的短期間で処分が終了している。

わが国における管理型廃棄物処分場は陸域に設置するタイプと海面に立地するタイプがあり、海面処分場の特徴

としては、以下の点が挙げられる。

- 広い面積と水深を利用できるため、1箇所数百万 m^3 から1,000万 m^3 以上の大規模な容量を有する。このため、特に大都市圏において海面処分場が選択される場合が多い。
- 生活空間から離れた場所に立地でき、船舶を用いることで廃棄物の運搬にともなう問題を軽減できる。
- 波浪、高潮、津波、地震などの厳しい外力が作用するため構造安全性に十分留意する必要がある。
- 海底が粘土地盤の場合は海底地盤自体が底面遮水層となる。

管理型廃棄物処分場のもっとも重要な機能は、廃棄物内部の水が処分場外に流出することを防止する機能である。海上工事では締固めができないため、海成粘土に間隙調整剤のベントナイト、施工に必要な強度を付与するゲル化剤(水ガラス)を添加することで、遮水性能を高めた地盤材料が開発され適用されてきた^{2),3),4)}。本材料は、海底面が砂地盤で底部の遮水が必要な場合には海底面に敷設され、側面については鋼矢板や鋼管矢板と組み合わせて遮水構造を形成する。

本研究では、放射性セシウムで汚染された廃棄物を対象とした海面処分場を想定し、海成粘土とベントナイト(多層構造による極めて大きな表面積を有し、層間における静電的結合により陽イオンに対する吸着が発生する。)を混合した遮水地盤材料の必要性能について検討し、各種配合条件のもとで室内試験を行い、性能について検討を行った。

2. 遮水材料の目標性能に関する検討

放射性セシウムで汚染された廃棄物処分場は、現行の技術基準による海面処分場に比べ、安全性に関する性能を大幅に高める必要がある。環境省は、放射能濃度 8,000Bq/kg 以下ならば自治体等の一般廃棄物最終処分場における埋立処分が可能とする指針を示しており⁵⁾、8,000Bq/kg 以上 100,000Bq/kg 以下の廃棄物を「安全が確認されるまで一時的に保管するべき放射能レベル」としている⁶⁾。以上のことから、本研究では「100,000Bq/kg の廃棄物を安全に管理できる性能」を有することを「安全性に関する性能を大幅に高めた高性能海面処分場」として設定することとした。ただし、廃棄物の処分と管理は、関係する人々の合意のもとに実施されるべきであり、本研究が目指す高性能海面処分場が仮に実現したとしても、どのレベルの放射線量の廃棄物の処分に利用するかは、関係する人々の合意により決定されるべきと考える。

2.1 最大溶出量の算出

海面処分場は海上に建設されるため、処分場内は海水で満たされる。処分場内の海水と放射性セシウム汚染廃棄物が接触すると、廃棄物に含まれる放射性セシウムが間隙水に溶出し、汚染水が発生する。そこで、茨城県守谷市、富久山町(福島県郡山市)、栃木県那須塩原市で採取された土壌や焼却灰に対して、放射性セシウムの含有量試験、溶出試験を実施した。表-1 に含有量・溶出試験結果を示す。また、溶出率の計算については式(1)のように計算した。

$$\text{溶出率} = \frac{\text{海水に溶出した放射性セシウム}(Bq/L) \times \text{海水の体積}(L)}{\text{放射性セシウム含有量}(Bq/kg) \times \text{試料の質量}(kg)} \times 100 \quad (1)$$

この結果をみると、土壌については付着した放射性セシウム

ムは比較的含有量が高いにも関わらず、海水中への溶出率は5%未満であり、ほとんど溶出していないことがわかる。一方で主灰については高いもので20%程度、飛灰については含有している放射性セシウムがほとんど海水中に溶出するという結果となった。これらの結果をもとに、土壌を含む不燃物、主灰、飛灰の溶出量を仮定し、本研究で対象とする 100,000Bq/kg の廃棄物の溶出率を簡易的に算出した。

まず、災害廃棄物量の内訳として石巻市における災害廃棄物物の内訳⁷⁾を参考にした(表-2)。これらの災害廃棄物には、リサイクル等により直接処分されない廃棄物も多いため⁸⁾、リサイクルされる可能性が高い廃自動車、廃船舶、廃家電を除き、不燃物に対しては直接埋立て、可燃物に対しては焼却処分後に埋立てされると仮定する。これらの仮定より直接埋立が行われる廃棄物は約480万t、焼却対象となる廃棄物は125万tとなる。焼却処分が行われると廃棄物から主灰と飛灰が発生する。一般的に可燃物を焼却処分すると90%減量でき、主灰：飛灰=7：3程度の割合で焼却灰が発生するが⁹⁾、本研究では主灰：飛灰=1：1と仮定した。よって、主灰、飛灰は125万トン/2=6.25万tずつ発生すると計算できる。

次にそれぞれ廃棄物の溶出率の設定を行った。飛灰については表-1より非常に放射性セシウムを放出しやすい廃棄物であることが予想されるため、溶出率を100%と仮定した。主灰については飛灰と比較して放射性セシウムは溶出しにくい、表-1より最大で21.2%程度の溶出率という結果があるが、安全側に見積もり主灰の溶出率を30%と仮定した。土壌を含む不燃物については表-3に示す福島県内中通り地域仮置場の瓦礫の放射性セシウム濃度と溶出濃度の調査結果¹⁰⁾を参考に放射性セシウムの溶出率を仮定した。表-3をみると、不燃物の放射性セシウムの溶

表-1 含有量・溶出試験結果

試料名	放射性セシウム[Bq/kg]						溶出濃度[Bq/L]			溶出率[%]			
	湿潤			乾燥			海水			海水			
	Cs134	Cs137	合計	Cs134	Cs137	合計	Cs134	Cs137	合計	Cs134	Cs137	合計	
土壌	守谷	7100	12000	19100	15000	25000	40000	13	24	37	1.8	2.0	1.9
	守谷 排水溝付近	3300	5300	8600	8000	13000	21000	12	18	30	3.6	3.4	3.5
	守谷 トンネル下	5600	9200	14800	11000	18000	29000	17	32	49	3.0	3.5	3.3
主灰	富久山クリーンセンター	18000	30000	48000	25000	41000	66000	9	14	23	0.5	0.5	0.5
	那須クリーンセンター	490	800	1290	700	1100	1800	11	16.0	27	22.4	20.0	21.2
	富久山クリーンセンター	920	1600	2520	1370	2400	3770	9	14.0	23	9.8	8.8	9.3
飛灰	那須クリーンセンター	6700	11000	17700	8000	13000	21000	660	1100.0	1760	98.5	100.0	99.3
	富久山クリーンセンター	5500	9700	15200	5500	10000	15500	480	780.0	1260	87.3	80.4	83.8

※Cs134の半減期は2.1年、Cs137の半減期は30.1年

表-2 石巻市における災害廃棄物の内訳⁷⁾

種類	廃棄物量(t)
建設等総量	3,968,940
建設等可燃物	1,064,184
うちチップ化	287,330
うち焼却処分	776,854
建設等不燃物	2,904,756
廃自動車	86,679
廃船舶	13,595
廃家電	9,612
水産物	27,452
倒木	153,934
汚泥	1,902,788
可燃物	1,245,570
不燃物	4,917,430
合計	6,163,000

表-3 福島県内中通り地域仮置場の瓦礫の放射性濃度と溶出濃度¹⁰⁾

	放射性Cs含有量 (Bq/kg-wet)				JIS K0058-1 有姿攪拌試験							
	放射性Cs溶出濃度 (Bq/L)		含水率	放射性Cs溶出率 (%)	放射性Cs溶出濃度 (Bq/L)			放射性Cs溶出率 (%)			pH	EC (mS/m)
	Cs134	Cs137			合計	Cs134	Cs137	合計	Cs134	Cs137		
大谷石	14400	16200	30600	6	<8.8	<9.0	<17.7	<0.6	<0.6	<0.6	7.4	1.8
セメントブロック	2990	3470	6460	3.6	<8.2	<9.8	<18.0	<2.7	<2.8	<2.8	9.5	4.7
スレー瓦	3000	3550	6550	1.2	<8.8	<7.9	<16.7	<2.9	<2.2	<2.5	8.3	5.3
木材	3480	4070	7550	9.1	<8.6	<8.4	<17.0	<2.5	<2.1	<2.2	6.7	1.7
トタン	4510	5020	9530	0	<8.3	<10.5	<18.8	<1.8	<2.1	<2.0	7.3	1.8
石膏ボード	120	136	256	18.2	<8.1	<7.8	<15.9	<67.7	<57.3	<62.1	7.2	227
瓦	597	672	1269	1.6	<8.2	<8.3	<16.5	<13.7	<12.3	<13.0	7.5	1
塩化ビニール管	6560	7290	13850	0.5	<9.4	<9.1	<18.5	<1.4	<1.2	<1.3	7.3	2.6

出濃度は測定可能な最低値以下であることがわかる。しかし、放射性セシウムの溶出率はそれぞれの廃棄物によって異なることが予想されるため、表-1の土壌の溶出試験結果を参考に、土壌を含む不燃物の溶出率を5%と仮定した。これらの仮定のもと、廃棄物全体の溶出率は式(2)のように計算できる。

$$\text{溶出率} = \frac{W_H \times E_H + W_S \times E_S + W_F \times E_F}{W} \times 100 = \frac{6.25 \times 1 + 6.25 \times 0.30 + 480 \times 0.05}{4925} \times 100 \approx 6.5\% \quad (2)$$

ここで、 W_H は飛灰の重量、 W_S は主灰の重量、 W_F は不燃物の重量、 W は廃棄物全体の重量、 E_H は飛灰の溶出率、 E_S は主灰の溶出率、 E_F は不燃物の溶出率である。式(2)のように6.5%と算出されたが、本研究ではより安全性を確保するために廃棄物全体の溶出率を10%と仮定した。

次に廃棄物の単位体積重量の設定を行った。表-4に災害廃棄物種ごとの見かけ比重および重量容積換算係数¹¹⁾を示す。正確な廃棄物の内訳や表-4に示した廃棄物以外の単位体積重量は不明だが、平均的に単位体積重量を15kN/m³(1500kg/m³)と仮定した。また、廃棄物の間隙比については0.80と仮定した。

以上の設定より、廃棄物に含まれる放射性セシウムが間隙水に溶出した後の、間隙水の放射能濃度は式(3)のように計算できる。なお、間隙水の放射能濃度の計算は全ての廃棄物の放射能濃度が100,000Bq/kgと仮定している。

$$\begin{aligned} \text{放射能濃度} &= \text{廃棄物の放射能濃度[Bq/kg]} \times \text{溶出率}[\%] \\ &\times \frac{\text{廃棄物の単位体積重量[kg/m}^3\text{]}}{\text{間隙比}} \\ &= 100,000 \times 0.1 \times \frac{1,500}{0.80} \times 1,000 = 18,750[\text{Bq/L}] \quad (3) \end{aligned}$$

2.2 遮水地盤材料性能の設定

次に遮水材料の遮水性能、吸着性能の設定を行った。まず、これらの設定を行うにあたり海面処分場の条件について仮定を行った。図-1に本研究で対象とする海面処分場の概略図を示す。消波ブロック、ケーソン等を用いた防波堤を設置することにより、外洋の潮汐、波浪、津波等による処分場への外力の作用、処分場内への海水の浸入を軽減させる。更にケーソン背後には、波減勢工を施工する。これは東日本大震災級の津波が来襲した際に、津波の越流を許容するものの、津波の勢力を減衰させ、処分場内の廃棄物との接触を避けるために施工する。また、本研究で対象とする遮水材料は原地盤上(遮水層)と遮水矢板間(遮水材料)に設置する。海面処分場の条件として、廃棄物埋立前において、遮水層に対して圧密応力20kPaが作用し、常に4mの水頭差が作用し、処分場内から処分場外への浸透が発生しているという条件を想定した。廃棄物については覆砂層上に投入すると想定している。わが国の平均的な干満差は2m前後であり¹²⁾、既存の海面処分場内の地盤

表-4 災害廃棄物種ごとの見かけ比重および重量容積換算係数¹¹⁾

発生時	がれき	混合ごみ(木造家屋系)		木くず	
		代表値	既報の範囲	代表値	既報の範囲
通常(乾燥)			0.59 t/m ³ (1.7 m ³ /t)	0.1-1.2 t/m ³ (0.83-10 m ³ /t)	0.2 t/m ³ (5.0 m ³ /t)
	水害ごみ	1.4 t/m ³ (0.71 m ³ /t)	1.0 t/m ³ (1.0 m ³ /t)		0.5 t/m ³ (2.0 m ³ /t)
仮置き時	1.2 t/m ³ (0.83 m ³ /t)	1.1-1.5 t/m ³ (0.67-0.91 m ³ /t)	0.79 t/m ³ (1.3 m ³ /t)		0.26 t/m ³ (3.8 m ³ /t)
搬出・処分時(破碎等含)	2.0 t/m ³ (0.5 m ³ /t)	1.6-2.5 t/m ³ (0.4-0.63 m ³ /t)	0.73 t/m ³ (1.4 m ³ /t)	0.6-2.5 t/m ³ (0.4-1.7 m ³ /t)	0.23 t/m ³ (4.3 m ³ /t)
備考	能登半島沖・阪神淡路での実績 +埼玉県災害廃棄物処理指針 +関東建設廃棄物協同組合 +長崎大水害(最適値)			能登半島沖・阪神淡路での実績 +建設混合廃棄物性状 +福井大水害(最適値)	

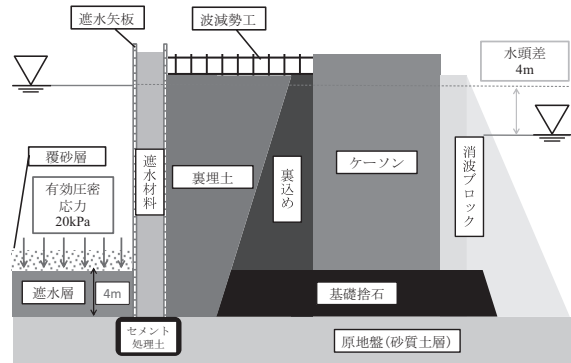


図-1 処分場概略図

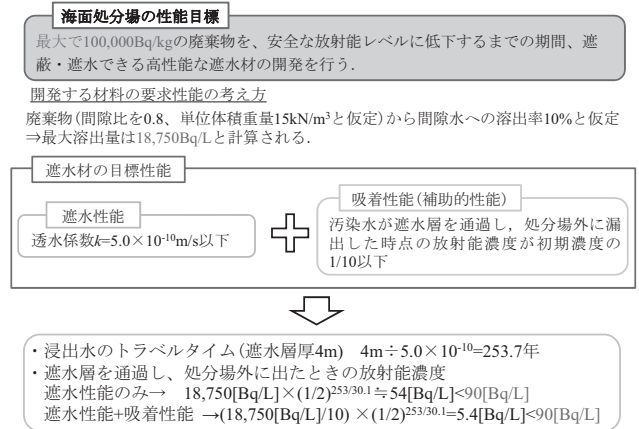


図-2 遮水性能の考え方

内水位を考えると「常に4mの水頭差が作用している」という条件は非常に厳しい条件といえるがより安全側に考えるため、このような条件を設定した。遮水性能については、式(4)に示す放射能濃度の減衰式を用いて最大溶出量18,750Bq/Lが原発の排水規制値以下となる時間を計算し、透水係数 k を計算した。

$$C = C_0 \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \quad (4)$$

ここで、 C は時刻 t での放射能濃度、 C_0 は初期放射能濃度、 T は放射性物質の半減期である。まず、式(4)を変形して、原発の排水規制値90Bq/kg以下となる年数は式(5)のように計算できる。

$$t = \frac{T \times \ln \frac{C}{C_0}}{\ln \frac{1}{2}} = \frac{30.1 \times \ln \frac{90}{18,750}}{\ln \frac{1}{2}} \approx 231 \text{年} \quad (5)$$

浸透流の条件より、汚染水が導水勾配 1 で遮水層 4m を通過する時間が 231 年となる透水係数 k は式(6)のように計算できる。

$$k = \frac{H}{t \cdot i} = \frac{4}{(231 \times 365 \times 24 \times 3600) \times 1} \doteq 5.5 \times 10^{-10} [\text{m/s}] \quad (6)$$

ここで、 H は遮水層厚さ、 t は透水時間、 i は導水勾配である。ただし、本研究では遮水性能の目標として式(6)の計算結果より安全側に見積もり、透水係数 $k=5.0 \times 10^{-10} [\text{m/s}]$ 以下と設定した。基本的に汚染水の遮蔽・遮水は遮水材料の遮水性能のみで行うが、遮水材料の補助的性能として放射性セシウムに対する吸着性能を付加した。吸着性能の目標については時間経過による放射能の減衰を考慮せずに、汚染水が遮水層を通過し、処分場外に漏出した時点の放射能濃度が初期濃度の 1/10 以下と設定した。

図-2 にここまで設定した仮定をまとめた図を示す。遮水性能の目標を達成した場合、遮水層を通過し処分場外に出たときの放射能濃度は、吸着性能が機能しなくても環境基準である 90Bq/L 以下を達成できる。また、遮水性能かつ吸着性能の目標を達成できた場合には、放射能濃度は 5.4Bq/L と計算され、環境基準を大きく下回ることがわかる。

3. 遮水性能の検討

3.1 用いた材料

本研究では、徳山港で採取された海成粘土(以下、徳山港粘土)、原料土に添加するベントナイトには、アメリカワイオミング州で採取された Na 型ベントナイト (以下、ベントナイト) を使用した。本研究で使用した徳山港粘土とベントナイトの物性値をそれぞれ表-5 に示す。これらを用いて、表-6 に示すような徳山港粘土とベントナイトの配合量が異なる試験体を 7 種類用意し、遮水性能・吸着性能の検討を行った。また試料作成については、徳山港粘土を含水比 w が液性限界 w_L の約 1.5 倍程度になるように八洲薬品株式会社のアクアマリン S と蒸留水を混合した人工海水(密度 1.03g/cm^3) で加水・調泥した後、表-6 の配合条件になるように徳山港粘土とベントナイトを混合させ、混合後含水比が 160%程度になるように加水し、ソイルミキサーを用いて十分に攪拌した。ただし、表-6 に示した配合量は徳山港粘土 $1.5w_L$ 時において、 1m^3 に対する乾燥状態のベントナイト添加量である。

表-5 本研究で使用した試料の物性値

試料	徳山港粘土	ワイオミング産ベントナイト
土粒子密度 $\rho_s [\text{g/cm}^3]$	2.616	2.898
液性限界 $w_L [\%]$	110.6	510.6
塑性限界 $w_P [\%]$	40.0	44.0
塑性指数 I_P	70.6	466.6

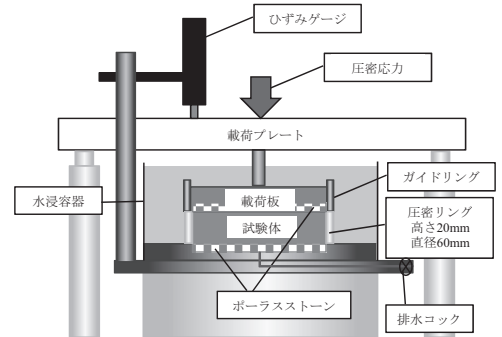


図-3 圧密試験装置概略図

3.2 試験方法

遮水性能については、表-6 に示した BO を除く試験体に対して図-3 に示すような圧密試験装置を用いて段階荷重圧密試験を実施し、検討を行った。また実際の現場では、遮水層の圧縮性を把握しておくことも重要であるため、試験から求まる試験体の圧縮特性についても検討を行った。通常の段階荷重圧密試験では、事前に予備圧密し、成形した試料を用いるが、本研究では予備圧密を行っていないスラリー状の試験体を、厚さ 20mm、直径 60mm の圧密リングに空気が混入しないように充填した。その後、圧密応力 4.9 から 627.2kPa、応力増分比 $\Delta p/p=1$ 、計 8 段階の段階荷重圧密を実施した。1 段階あたりの荷重時間については、 \sqrt{t} 法を用いて決定した。試験から求まる圧密係数 c_v と体積圧縮係数 m_v を用いて、透水係数 k を式(7)のように算出し、各試験体の遮水性能の比較を行った。ただし、 γ_w は水の単位体積重量である。

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (7)$$

3.3 試験結果

図-4 に透水係数 k と平均圧密応力 p の関係を示す。これより、徳山港粘土にベントナイトを添加するにしたがって、同平均圧密応力下で透水係数が小さくなっていることがわかる。これは、ベントナイトに含まれるモンモリロナイトが大量の水を吸収し膨潤したため、間隙が充填され、透水係数が低下したと考えられる。また、荷重初期段階においてばらつきが発生してしまった原因として、試験体

表-6 配合条件

試料名	T0	T25	T50	T75	T100	T150	BO
配合比	徳山港粘土のみ	徳山港粘土 1m^3 に対してベントナイト 25kg 添加	徳山港粘土 1m^3 に対してベントナイト 50kg 添加	徳山港粘土 1m^3 に対してベントナイト 75kg 添加	徳山港粘土 1m^3 に対してベントナイト 100kg 添加	徳山港粘土 1m^3 に対してベントナイト 150kg 添加	ベントナイトのみ
重量比 粘土 : ベントナイト	-	20.1 : 1	10.0 : 1	6.7 : 1	5.0 : 1	3.3 : 1	-

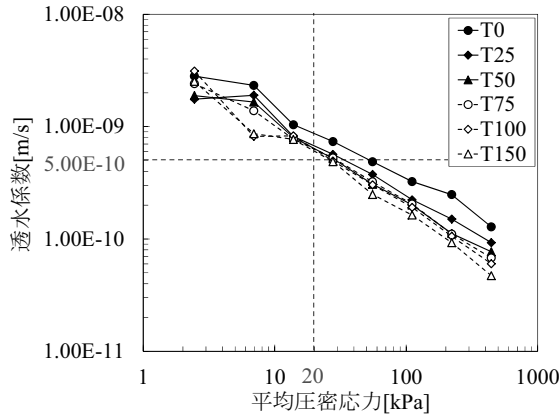


図-4 $k-p$ 曲線

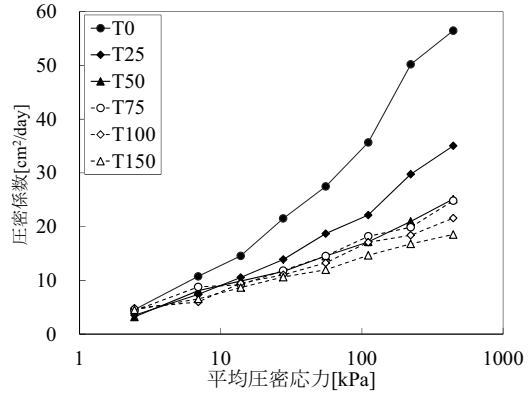


図-5 c_v-p 曲線

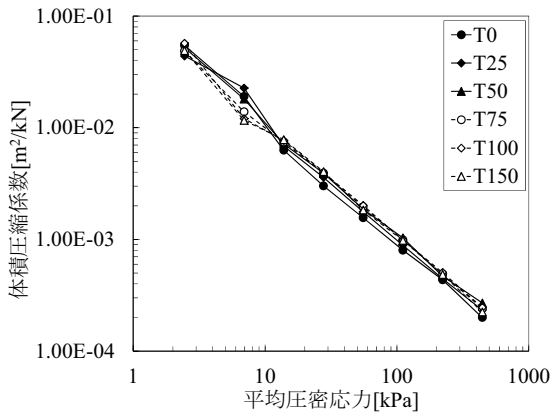


図-6 m_v-p 曲線

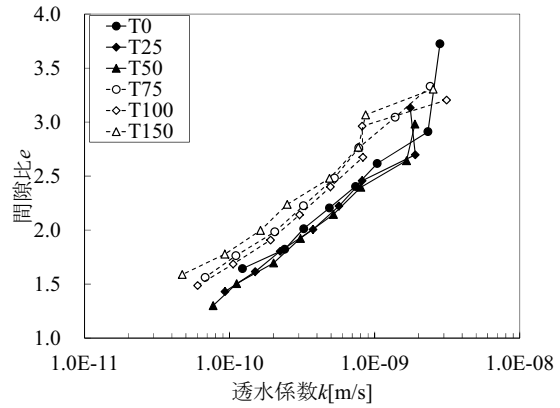


図-7 $e-k$ 曲線

が荷初期段階では柔らかく、荷板が不安定になり、変位測定にばらつきが生じてしまったためと考えられる。また、低応力状態における試験体と圧密リング間での摩擦の不均一性も原因と考えられる。

図のように試料の透水係数は圧密応力とともに低下するので、海面処分場の遮水材料として使用するときの有効な圧密応力が問題となる。通常の海面処分場では遮水材料の上に保護土層（通常は砂で厚さは 2m 程度）を敷設し、その上に廃棄物を投入する。したがって、遮水材料の有効応力は廃棄物投入時点での遮水層と保護土層の上載圧と圧密度によって決まることになるが、これはおよそ 20kPa であると考えられる。今回の試験結果の範囲では、想定される有効圧密応力 20kPa 下で、遮水性能の目標値 $k=5.0 \times 10^{-10} \text{m/s}$ 以下を達成した試験体はなかった。しかし、有効圧密応力を 10kPa 程度増加させれば目標値に達するので、廃棄物投入前の遮水層の有効圧密応力の増加策を検討する必要があると考えられる。具体的には、保護土層による上載圧の増加、あるいは廃棄物処分場内部と外部の水位差を利用した浸透圧密が考えられる。

図-5 は圧密係数 c_v と平均圧密応力 p の関係である。図-5 を見ると、徳山港粘土に対してベントナイトの添加量が多いほど同平均圧密応力化下での圧密係数の値が小さくなっていることが分かる。これは、ベントナイトが間隙中の自由水が吸収し、試験体内部の土粒子の間隙を充填したため圧密係数を低下させたと考えられる。

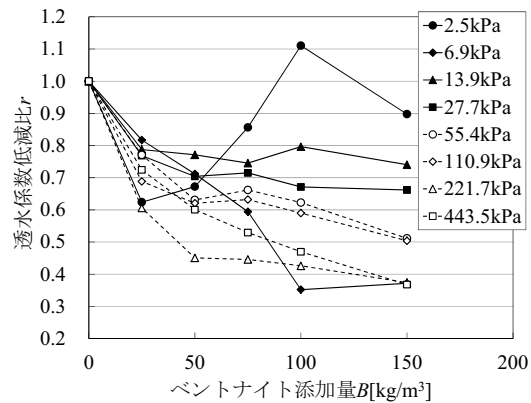


図-8 $r-B$ 曲線

図-6 に体積圧縮係数 m_v と平均圧密応力 p の関係を示す。荷初期段階を除き全ての試料が概ね一致している。ばらつきの原因としては、やはり図-4 で述べた原因によるものと考えられる。

図-7 に間隙比 e と透水係数 k の関係を示す。透水係数の低下がベントナイトの間隙充填効果のみであるならば、ベントナイトの添加量増加に伴い間隙比は低下し、同間隙比下での透水係数は一致するはずである。しかし、結果をみると T0, T25, T50 の試験体については前述の傾向がみられるが、それ以上の試験体については同間隙比下で、ベントナイト混合量が多いほど透水係数が小さい。また、ベントナイトの添加量が多いほど間隙比が増加している。これはベントナイト添加により徳山港粘土の間隙体積よりベ

ントナイトの膨潤体積が大きくなり間隙比が増加したと考えられる。このことからモンモリロナイトの持つ膨潤性を確認することができる。

図-8にそれぞれの平均圧密応力における透水係数低減比 r とベントナイト添加量 B の関係を示す。透水係数低減比 r は式(8)のように定義する。

$$r = \frac{k_x}{k(\text{TO})} \quad (8)$$

ここで、 k_x は任意のベントナイト添加量での透水係数、 $k(\text{TO})$ はベントナイト無添加の場合の透水係数である。図-8より、平均圧密応力が 2.5kPa、6.9kPa の载荷初期段階の場合を除き、徳山港粘土にベントナイトを添加することで透水係数が初期透水係数の最小で約 0.35 から最大で 0.8 倍に低減していることがわかる。

4. セシウムの吸着性能の検討

4.1 試験方法

吸着性能の検討については、試験体と放射性セシウムの代替である、安定セシウム(以後、セシウム)溶液を混合させ、振とう攪拌させる振とう試験(バッチ試験)を行った。本来は実際に放射線を発生させる放射性セシウムを用いるべきであるが、安全のため安定セシウムを採用した。表-6に示した全ての試験体 20g(乾燥重量)と塩分濃度 3%の人工海水を溶媒とした様々な濃度のセシウム溶液 200mLを混合させ、振とう攪拌させた。振とう攪拌終了後、混合液を採取し、遠心分離機を用いて 30 分間、3000rpm で遠心分離させ、上澄み液を採取した。採取した上澄み液は原子吸光分析機により濃度測定を実施し、各試験体の吸着性能の比較を行った。吸着性能は、供与液中の濃度が一定となる時、つまり濃度平衡状態において評価を行う。そこで、本研究では振とう攪拌試験による吸着性能の評価を行う前段階として、セシウムの吸着量の経時変化について調べた。試験体として徳山港粘土 20g(乾燥質量)とセシウム溶液 200mL を混合させ、振とう時間を 0.5、1.0、3.0、6.0、24 時間の 5 段階に設定し、振とう攪拌を行った。図-9にセシウム溶液の初期濃度が 10ppm、30ppm の場合吸着量と振とう時間の関係を示す。また、吸着量 S [mg/kg] は式(9)より計算した。

$$S = (c_0 - c_{eq}) \cdot \frac{V}{m} \quad (9)$$

ここで、 c_0 はセシウム溶液の初期濃度、 c_{eq} は平衡濃度、 V はセシウム溶液の体積、 m は試験体の質量である。

図-9より、セシウム溶液の初期濃度が 10ppm、30ppm のいずれの場合においても、振とう攪拌開始 1 時間以前において吸着は平衡状態となっていることがわかる。これより本研究では、振とう時間を 1 時間と設定して、各試験体の吸着性能の検討を行うこととした。各試験体の吸着性能は分配係数を用いて評価を行った。分配係数とは異なる状

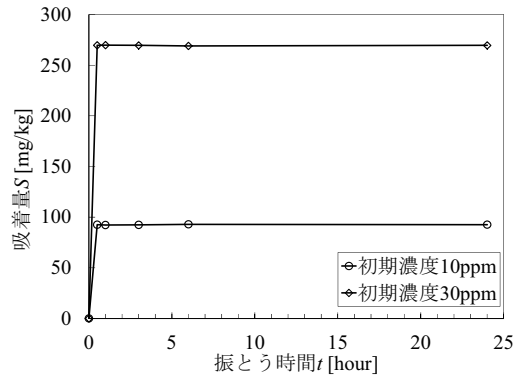


図-9 吸着量の経時変化

態の物質(今回は液体と固体)の濃度比である。分配係数は式(10)のように計算され、吸着量が大い分配係数が大きくなるため、この係数を用いることで吸着性能を評価できる。

$$\text{分配係数 } K_d = \frac{\text{吸着量 } S \text{ [mg/kg]}}{\text{平衡濃度 } c_{eq} \text{ [ppm]}} \quad (10)$$

4.2 試験結果

図-10に振とう攪拌試験から得られた各試験体の吸着量と平衡濃度の関係を示す。また、プロット点横に表示しているラベルは、セシウムの初期濃度を示している。試験結果を見ると吸着量と平衡濃度の関係は直線関係にはなっていないことが分かる。また、初期濃度が増加するに従い、吸着量の増加勾配が減少していることが分かる。これは、セシウムの初期濃度が比較的低い段階では未吸着のものが多いために吸着力は強いが、初期濃度が高くなるにつれ、セシウムを吸着した粘土鉱物が多くなり、吸着しきれずに平衡濃度が高くなることで試験体単位質量あたりの吸着量が低下したためだと考えられる。

図-11に振とう攪拌試験から得られた分配係数 K_d とセシウム溶液初期濃度 c_0 の関係を示す。どの試験体もセシウム溶液の初期濃度が増加するにつれて、分配係数が低下していることが分かる。これは、試験体がセシウムを吸着しきれず、セシウムの平衡濃度が大きくなってしまったからだと考えられる。また、各試験体の吸着性能の比較をすると、同初期濃度下において分配係数の値に大きな差異がみられないことが分かる。したがって、徳山港粘土にベントナイトを添加しても、振とう攪拌による吸着性能に影響を与えないことが分かった。また、セシウム溶液の溶媒が海水ではなく真水の場合の分配係数として 24 から 63mL/g が報告されており¹³⁾、今回の値はこれに比べて全体的に小さかった。これより、海水が含むイオンにより吸着の阻害が発生したと考えられる。

図-12に吸着率 P とセシウムの初期濃度 c_0 の関係を示す。吸着率 P は式(11)のように計算した。

$$P = \frac{c_0 - c_{eq}}{c_0} \times 100 \quad (11)$$

また、表-7に表-1より算出した放射性セシウムと安定

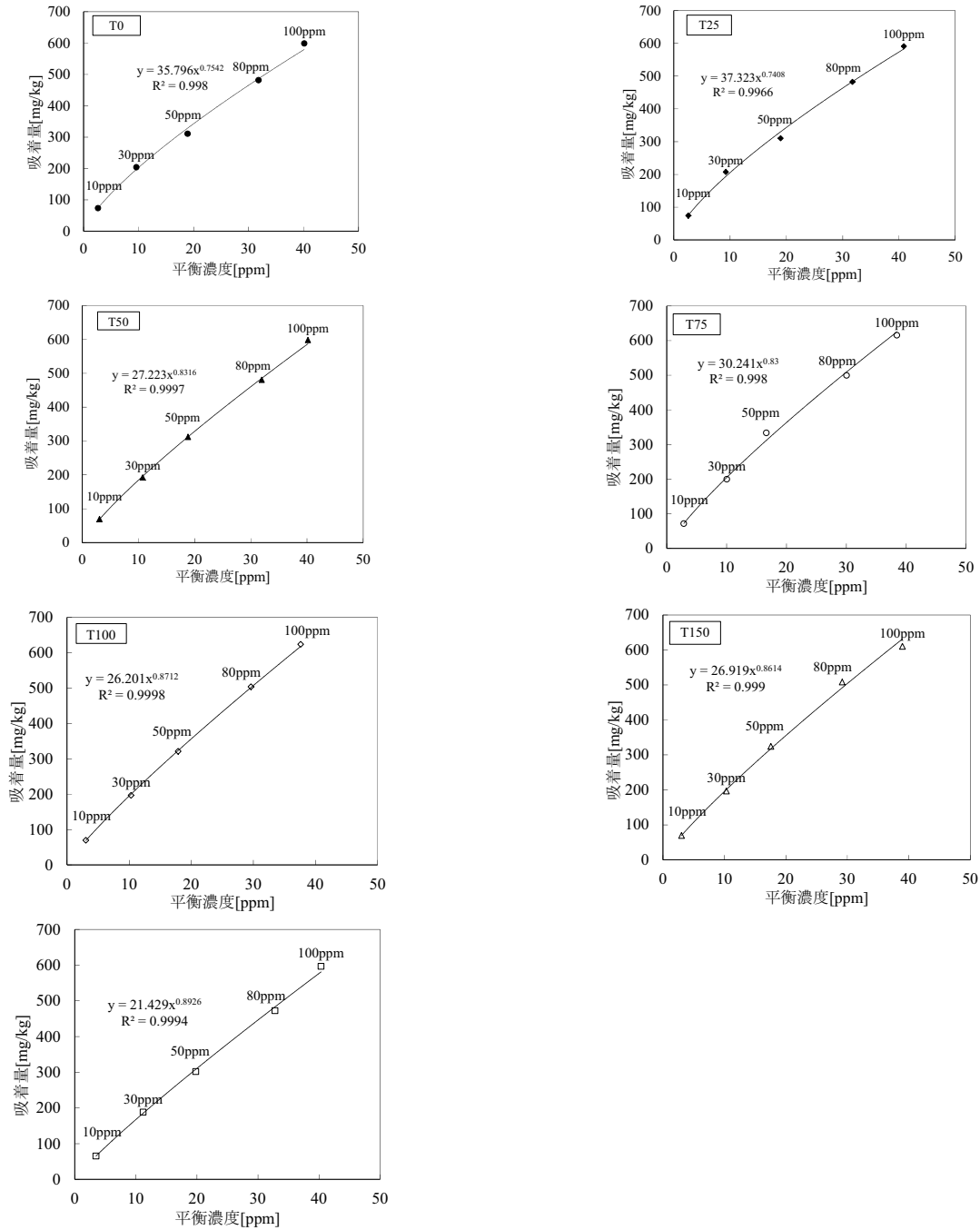


図-10 吸着量と平衡濃度の関係

セシウムの含有量比の関係を示す。但し表-7中の安定セシウムの溶出濃度は式(3)と同様に計算した。これより、100,000Bq/kgの放射性セシウムの安定セシウム相当量は最大で4.5ppmから最小で13.6ppmである。図-12よりこの範囲の吸着率はどの試験体も65~75%である。よって、この観点よりみると、本研究の吸着性能の目標である90%は達成できなかったといえる。しかしここでの吸着性能の検討では、セシウム溶液200mLに対して20g(乾燥重量)の試料を振とう攪拌させる方法を用いており、実際の処分場の状況を模した方法とはいえない。すなわち、試料に対してセシウム溶液の濃度が実際よりも非常に高い状況で吸着特性を調べたものである。よって、今後は圧密した試験体にセシウム溶液を通水させるなど、遮水材料が実際に適用された状況を模した試験を行って吸着特性を把握す

る必要がある。

5. 結論

- 1) 求められる性能を「放射能レベル100,000Bq/kgの廃棄物を安全に管理できる性能」として検討を行い、遮水地盤材料の性能を透水係数 $k=5.0 \times 10^{-10}$ m/s以下と設定した。吸着性能の目標については時間経過による放射能の減衰考慮せずに、汚染水が遮水層を通過し、処分場外に漏出した時点の放射能濃度が初期濃度の1/10以下と設定した。
- 2) 海成粘土にベントナイトを添加するにしたがい透水係数は低下した。今回の試験結果では、有効圧密応力20kPa下において透水係数の目標値 $k=5.0 \times 10^{-10}$ m/s以下を達成した試験体はなかった。しかし、平均圧密応力

表-7 放射性セシウムと安定セシウムの含有量比

試料名	セシウム含有量(乾燥時)		10000Bq/kgの廃棄物想定時		
	① 放射性Cs137 Bq/kg	② 安定Cs133 mg/kg	③ 100,000Bq/kg /放射性Cs137含有量 (100,000Bq/kg÷①)	安定Cs133 mg/kg (②×③)	安定Cs133 溶出濃度 ppm(mg/L)
土壌 底質	守谷	25,000	5.00	4.0	20.0
	守谷排水溝付近	13,000	4.30	7.7	33.1
	守谷トンネル下	18,000	4.80	5.6	26.7
焼却灰 (主灰)	富久山クリーンセンター	41,000	4.20	2.4	10.2
	那須塩原クリーンセンター	1,100	0.80	90.9	72.7
飛灰	富久山クリーンセンター	2,400	1.00	41.7	41.7
	那須塩原クリーンセンター	13,000	2.40	7.7	18.5
	富久山クリーンセンター	10,000	1.70	10.0	17.0

を 10kPa 程度増加すれば目標値に達するので、廃棄物投入前に遮水層に作用する有効圧密応力を増加させることを工夫する必要がある。

- 3) セシウム溶液 200mL に対して 20g (乾燥重量) の試料を加え振とう攪拌させる方法で求めたセシウムの吸着性はペントナイトを添加してもほぼ変化しないことが分かった。また、本試験では吸着率は目標の 90% に達成できなかった。今後は、圧密した試験体にセシウム溶液を通水させるなど、遮水材料が実際に適用された状況に適合した試験を行って吸着特性を把握する必要がある。

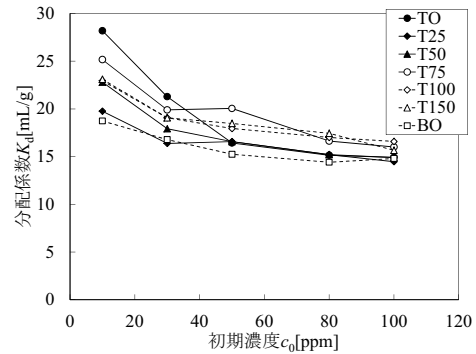


図-11 K_d-c₀ 曲線

参考文献

- 1) 土田孝, 水上純一, 菊池喜昭, 吉野博之: 阪神・淡路大震災におけるガレキの処理・活用に関する調査と考察, 港湾空港技術研究所資料, No.0899, 1998.
- 2) 渡部要一, 土田孝, 斉藤邦夫, 山田耕一, 上野一彦: 粘土系遮水材料における微視構造と透水係数の関係, 第 47 回地盤工学シンポジウム, pp.381-388, 2002.
- 3) 山田耕一, 鶴飼亮行, 伊野同, 土田孝, 渡部要一: 変形追従性材料を用いた遮管理型廃棄物海面処分場の遮水工法に関する実海域実証実験, 海洋開発論文集, 第 19 巻, pp.177-182, 2003.
- 4) 上野一彦, 山田耕一, 渡部要一: 管理型海面処分場に用いる浚渫粘土を主材料とした土質遮水材料の提案, 土木学会論文集 G, Vol.64, No.2, pp.177-186, 2008.
- 5) 環境省: 福島県内の災害廃棄物の処理の方針, 2011, http://www.env.go.jp/jishin/attach/fukushima_hoshin110623.pdf.
- 6) 環境省大臣官房廃棄物・リサイクル対策部: 8,000Bq/kg を超え 100,000Bq/kg 以下の焼却灰等の処分方法に関する方針について, 2011, <http://www.env.go.jp/jishin/attach/no110831001.pdf>.
- 7) 宮城県石巻市生活環境部災害廃棄物対策課: H23.3.11 東日本大震災に伴う災害廃棄物の取り組みについて, pp1~7, 2012, <http://www.city.ishinomaki.lg.jp/cont/10181000>.
- 8) 環境省: 東日本大震災に係る災害廃棄物の処理指針(マスタープラン), pp1~7, 2011, http://www.env.go.jp/jishin/attach/haiki_masterplan.pdf.
- 9) 上伊那広域連合: 新ごみ中間処理施設における焼却

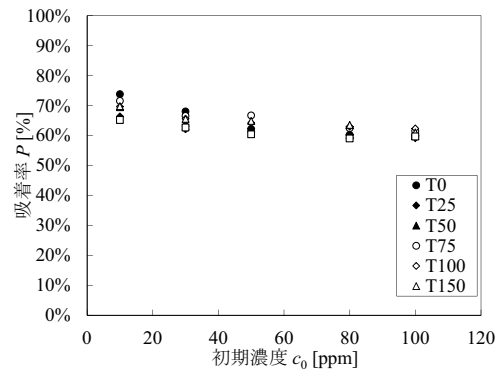


図-12 吸着率 P と初期濃度 c₀ の関係

残渣(灰)処理について, 資料 No.3 協議(1)-①関係, pp.1, 2010, http://www.valley.ne.jp/~kamiina/trash/about_trash/pdf/no3-3_shiryuu_h22.pdf

- 10) (独)国立環境研究所資源循環・廃棄物研究センター: 放射性物質の挙動から見た適正な廃棄物処理処分, pp.32, 2012, http://www.env.go.jp/jishin/attach/haikiyouka_kentokai/10-mat_3.pdf.
- 11) (独)国立環境研究所: 災害廃棄物の重量容積変換について(第一報), 2011, https://www.nies.go.jp/shinsai/dwaste_sprgv1_20110404.pdf.
- 12) 第七管区海上保安本部海洋情報部 HP: 海に関する Q & A, 潮汐・潮流 <http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KAN7/soudan/zirei.htm#1>
- 13) 国立環境研究所資源循環・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, p38-41, 2012.

(2013年6月24日 受付)