

水力学的分級およびサクシオン圧密による 土壌洗浄装置の開発

山下 祥平^{1*}、Wang Jue¹、京藤 敏達¹、木俣 陽一²、楠岡 弘康³

¹筑波大学大学院システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1)

²若築建設株式会社技術設計部 (〒153-0064 東京都目黒区下目黒 2-23-18)

³佐藤工業株式会社多角化事業統括部 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町 4-12-19)

A New Soil-Washing Instrument due to a Hydrodynamic Classification and a Suction Consolidation

Shohei YAMASHITA^{1*}, Jue WANG¹, Harumichi KYOTOH¹,
Yo-ichi KIMATA², and Hiroyasu KUSUOKA³

¹Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba
(Ten-noudai 1-1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-8573, Japan)

²Wakachiku Construction Co., Ltd. (Shimo-meguro 2-23-18, Meguro-ku 153-0064, Japan)

³Sato Kogyo Co., Ltd. (Nihon-bashi Hontyou 4-12-19, Tyu-ou-ku 103-8639, Japan)

Summary

The purpose of the present study is to develop a simple system of the wet classification for the contaminated soil, where the sieve is replaced by a hydrodynamic-classification devise and the consolidation of flocculation-sediments is performed by a suction-consolidation devise located in the sedimentation tank. The hydrodynamic classification can process a large amount of soil continuously, and the suction-consolidation devise can improve the volume reduction rate for the muddy water treatment since polymer liquid is unnecessary. Soil washing experiments showed that the classification was carried out within the range of 10 μ m difference in diameter compared to the threshold value of the present devise. The accuracy can be improved by optimizing the size of the channels in the classification layer. Also, a partition plate, laminated inclined-settlers and the suction-consolidation devise could reduce the suspended solids in the circulated water by a few hundred mg/L and stabilize the muddy water treatment in the sedimentation tank. Furthermore, the clay layer developed by the suction consolidation on paper drains of the devise, which water content ratio is around 110 %, was shown to be peel off by vibrators, so that the muddy-water treatment can be operated continuously.

Key Words: Soil washing, Hydrodynamic-classification, Suction-consolidation, Lamella settlers

1. はじめに

福島第一原子力発電所事故の影響で土壌が広範囲にわたって汚染され、膨大な放射能汚染土壌が発生し、その受け皿となる処分場も限られていることから、発生した汚染土壌をいかに減容化するかが課題となっている。また、中間貯蔵施設に保管される土壌の内、30年後も基準値以上の放射線量を有するものは、再度最終処分施設に移動する必要があることなど、

最終処分の実施を考慮すると、土壌の減容化技術の開発が必要とされている。このような状況を考慮し、除染技術実証試験事業が行われ、汚染土壌の減容化技術として主に3つの方法、分級、化学除染、熱処理が提案された。一方で、セシウムは粘土に強く吸着され脱離が難しいことが判明した¹⁾。したがって、化学除染と熱処理によるセシウムの除去では粘土の層構造を破壊する必要があるため、減容化率は高いが高コス

*Corresponding author: E-mail: s1320972@u.tsukuba.ac.jp

トとなる。一方で、分級は土壌から物理的に粘土を分離するため、減容率は低いのが現実的なコストで実施することができる²⁾。ただ、分級は他の2つの方法に比べて低コストであるが、表層土の剥ぎ取りのみと比べて高コストとなるため、実証試験以外では採用されていない。しかし、中間貯蔵施設の建設が具体化するにつれて、分級による減容化および再生土の利用が検討され始めている。湿式分級による除染は、土壌の攪拌、ふるいによる分級、粘土・シルトの水からの分離(泥水処理)という複数のプロセスから成り、設備も大掛かりとなる。特に、泥水処理ではフィルタープレスなどの大型の装置を要し、さらに高分子凝集剤を混入するため減容率が低下する。結果的に、膨大な量の土壌洗浄に対してはコスト高となるため、現時点では現地の除染に採用されるに至っていない。

そこで、本研究では、湿式分級を行う簡易で実用的な装置およびシステムの開発を目的とした³⁾。本装置の特徴は、既存の篩分級ではなく水力学的分級を採用したこと、および、高分子凝集剤を混入せずに泥水処理を行うために沈殿槽にブロックの圧密装置を設置したことである。水力学的分級によれば、粒径がある閾値よりも大きな粒子は槽内に設置した構造体を通り過ぎず結果的に分級が行われ、この構造体の間隙は分級粒子径の閾値よりも十分大きくすることができる。除染における土壌洗浄では、放射性セシウムを吸着した粘土を分離することが目的であり、粒径の閾値を正確に制御することは重要ではない。また、沈殿槽の粘土ブロックの圧縮層をペーパードレーンで圧密し、圧密ブロックをペーパードレーンから剥離し回収することで、土壌洗浄装置の連続稼働が可能となる。本論文では、以上の装置による分級特性および連続稼働の可

能性について議論する。

本論文の構成は、以下の通りである。第2章では土壌洗浄装置の詳細および機能について説明する。第3章では、実験目的および実験方法について述べる。第4章では、実験結果およびその考察を行う。最後に第5章で結論を述べる。

2. 実験装置および作動原理

(1) 実験装置概要

図1に土壌洗浄装置の概要図を示す。装置は分級槽(図1右)および沈殿槽(図1左)からなり、これらを通る濁水処理の流れは以下のとおりである。

まず、分級槽下部に設置された土砂搬入口から土砂を投入し、ポンプ(ニクニ 40CPFD6-22ZEM-D)からの噴流で土砂を攪拌する。攪拌後の濁水は、前記噴流に伴う渦流を均一化するスタティックミキサー(整流層)を通過する。次に、濁水の一様な流れは、鉛直ハニカム(層流層)を通過することで、乱流が低減される。その後、細粒土を含む濁水は、斜めハニカム(分級層)を通って沈殿槽に移る。この粘土およびシルトを含む濁水に無機凝集剤(多木化学:PAC300 A)を混入するとブロックが生成され、沈殿槽内の仕切り板および傾斜板を通ったのちブロックが沈降除去された水は、流量計(型式:FD-M100 AT)を通過してポンプに入り、再び分級槽下部に戻る。ここで、沈殿したブロックは圧密装置により減容化される。

以下、これらの各層の構造および機能について詳細に説明する。

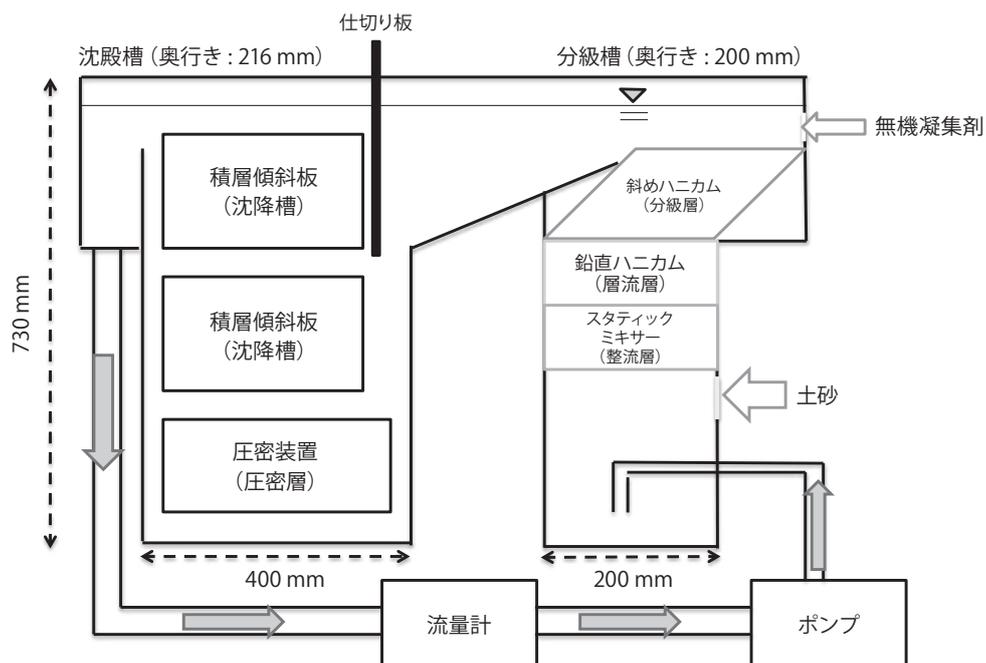


図1 実験装置概要図

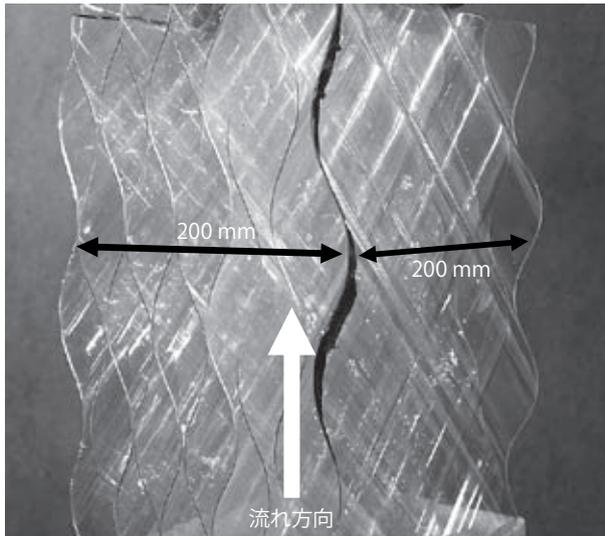


図2 スタティックミキサー

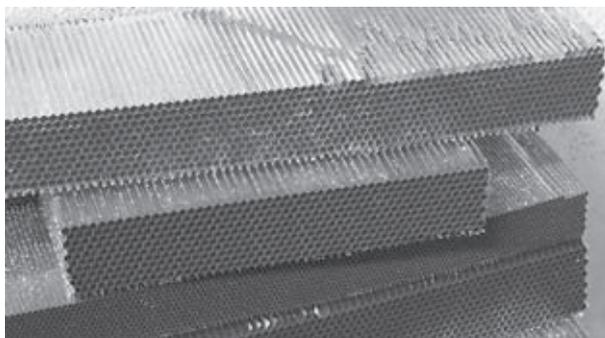


図3 ハニカム構造体

(2) 分級槽

a) 整流層 (スタティックミキサー)

整流層は、大きな渦が層流層および分級層に到達するのを防ぐ役割を担う。整流層に設置したスタティックミキサー (図2 参照) は、波板 (波長: 100 mm、振幅: 20 mm) を積層したもので、局所的な流れを断面内に分散させ、全体的に一様な流れに変化させる。今回の実験装置では横 200 mm 幅 200 mm 高さ 100 mm の積層板の向きを変えて二つ重ねて挿入している。

b) 層流層 (鉛直ハニカム)

層流層は、粒径の大きなシルトなどが乱流拡散で分級層を通過しないように、乱流を低減する目的で設置されている。図3のようなハニカム構造体 (横 200 mm 奥行き 200 mm 高さ 100 mm セルサイズ 4.2 mm) を鉛直に挿入する。ハニカムのセルサイズは、層流条件 ($Re < 2300$) を満たすように選ばれる。分級層の断面平均流速と層流層鉛直ハニカムにおける断面平均流速が等しいと仮定すると、本実験装置での層流層で乱流になる流量は 180 L/min 程度となる。

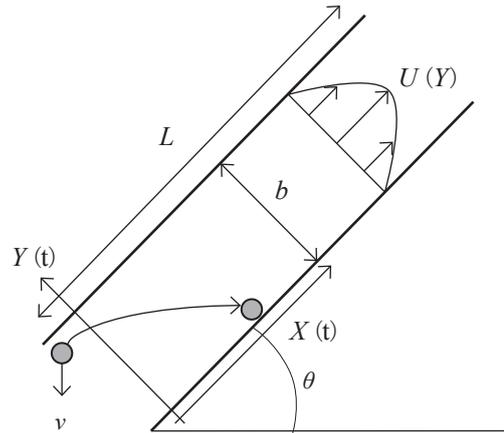


図4 傾斜管路中の土壌粒子の軌跡

c) 分級層 (傾斜ハニカム)

分級層は、沈降速度がある閾値を超える粒子が通過できないように設計される。概念図を図4に示す。傾斜管路入り口から侵入した粒子は、重力の作用により沈降しながら、流体力により管路上流に移動する。管路出口に到達する前に管路底部に接触する粒子は、管路底部に沈殿し滑動して管路入り口から排出されることで分級される。本実験では、ハニカム構造体 (セルサイズ 3.8 mm、長さ 100 mm) を鉛直に対して 45 度傾斜させたものを、分級槽上部に並列に配置した。この粒径閾値は、以下の議論により決定される。

まず、懸濁液中の粒子の沈降速度 v は、既往の研究から以下のように表現される⁴⁻⁵⁾。

$$v = u_0 f(c), \quad f(c) = (1 - c)^n, \quad u_0 = \frac{(\rho_s - \rho_f) g d^2}{18\mu} \quad \dots\dots (1)$$

ここで、 u_0 は単一粒子の沈降速度、 c は懸濁液の体積分率、 d は粒子径、 g は重力加速度、 μ は粘性係数、 ρ_s, ρ_f はそれぞれ粒子密度と液体密度である。指数 n は実験から決定される。管路内の流れを層流になるように設計し、粒子が十分に小さく、粒子が管路内壁に接触することなく移動すると仮定すると、粒子の軌跡 ($X(t), Y(t)$) は以下の式で表すことができる^{1), 4-5)}。

$$\frac{dX}{dt} = -v \sin \theta + \frac{6U_m}{b^2} Y(b - Y) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dY}{dt} = -v \cos \theta$$

式 (2) を $X(0) = 0, Y(0) = b, X(t) = L, Y(t) = 0$ として解くと、粒子が管路底面に到着するときの入り口からの距離 L は以下ようになる。

$$L = \frac{bU_m - vb \sin \theta}{v \cos \theta} \dots\dots\dots (3)$$

この結果から分級する粒子の粒径閾値は、流速の最大値 U_m 、管路の長さ L 、管路内径 b と傾き θ によって決定することができる。本実験では、 $b=3.8 \text{ mm}$ 、 $L=100 \text{ mm}$ 、 $\theta=45^\circ$ より、流量 $Q=20 \text{ L/min}$ で $d=52 \mu\text{m}$ 、流量 $Q=10 \text{ L/min}$ で $d=40 \mu\text{m}$ となる。

(3) 沈殿槽

a) 仕切り板

仕切り板は分級槽から流入する濁水を沈殿槽底部に導くとともに、その背後の沈殿槽上層の濁水濃度を低減する役割を担う。本実験では、幅 216 cm、厚み 10 mm のアクリル板を装置上面から 230 mm の深さまで挿入する。

b) 沈降層 (積層傾斜板)

図 5 はアルミ板の傾斜角度と間隔を外枠で固定して積層したものである。今回の実験装置では、傾斜角度 60 度、間隔は 7 mm である。本実験では沈殿槽にこの積層傾斜板を縦に 2 つ挿入する。また、アルミ板が実験装置全体の長手方向と水平になるように設置する。

c) 圧密層 (サクシオン圧密装置)

図 6 は垂直に等間隔で並べたパーパードレーン (前田工織 : CB ドレーンエコ) の両端を 2 枚ずつのアルミ板で固定したものである。固定する際に、一方の端のアルミ板に空気室を作れるように端を残してくりぬいたアルミ板を 2 枚の間に挟んでいる。また、吸引によってドレーンの不織布まわりに固着した粘土塊を脱離するために、エアバイブレータ (Netter 社 : NCT3) を外枠のアルミ板に固定し、チューブでコンプレッサ (藤原産業 : SR-L30 MPT-01) と接続した。

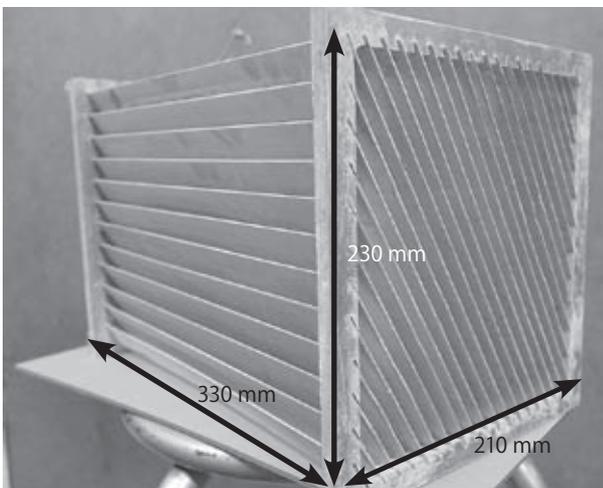


図 5 傾斜積層板

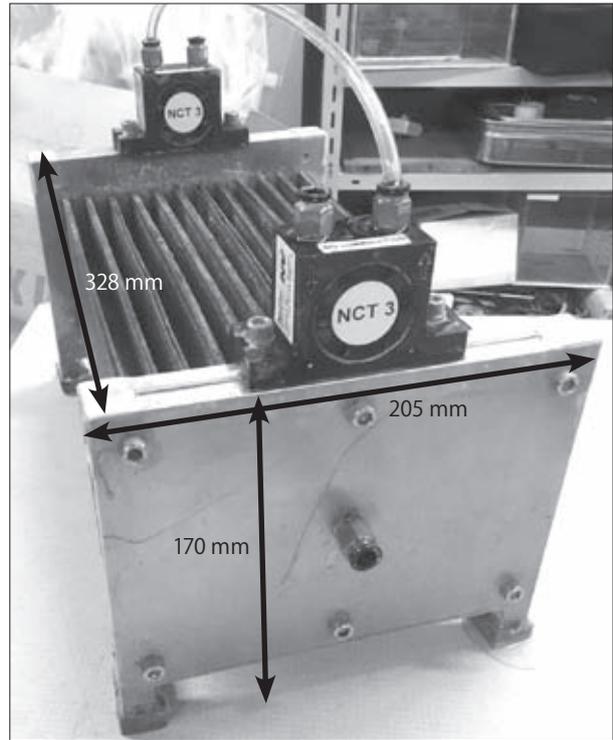


図 6 サクシオン圧密装置

3. 実験目的および実験方法

(1) 実験目的

本実験では前節で説明した装置群がシステムとして機能するかを検証するために、模擬土壌 (カオリンと硅砂の混合物) と名古屋港で採取された土壌 (名古屋土壌) を用いた土壌洗浄実験を行う。模擬土壌は 75%wt のカオリンを含むため、粘土が多い土壌の洗浄および泥水処理の可否を検証するために作製した。また、名古屋土壌は、 $100 \mu\text{m}$ 以下の細粒土が連続的に分布しているため、分級層の機能を検証するために採用した。

本章では、まず、作動流量が変化することで分級及び沈殿現象にどのような影響が表れるかを調査する。さらに、積層傾斜板とサクシオン圧密の有無を変化させて実験を行うことで、それらの装置の効果を検証する。

(2) 実験方法

模擬土壌は、カオリンに東北硅砂 8 号を混合して作製した (表 1 参照)。カオリンを多く混合した理由は、本装置でフロックの沈降および圧密が良好に行えるかどうかを確認するためである。また、名古屋港で採取された土壌 (名古屋土壌) は、細粒土の粒径が連続的に分布しており、分級の効果の検証および実際の土壌の沈降・圧密について検討するために使用した (表 2 参照)。

図 7 に実験のフローチャートを示す。土壌は予め水に溶か

表1 模擬土壌実験条件

水温 °C	試料		凝集剤		サンプル採取	
	種類	重量 kg	希釈度合い	流量	時間間隔	採取量
16	カオリン	3.0	10 倍	30L/min	5 分	1L
	東北硅砂	1.0				

表2 名古屋土壌実験条件

水温 °C	試料		凝集剤		サンプル採取	
	種類	重量 kg	希釈度合い	流量	時間間隔	採取量
16	名古屋土壌	2.1	10 倍	50L/min	5 分	1L

し、全量の1/60を30秒間隔で土砂搬入口から投入する。また、実験中の濁水試料の採取は、5分毎とし、沈殿槽流入部および流出部で行う。無機凝集剤の量は事前のビーカー試験で決定した。実験では、流量、土壌の種類、傾斜板の挿入の有無、サクシオン圧密の有無を変化させることで、それらの効果について調べる。

図8に圧密工程の概略図を示す。圧密を行う場合は、実験装置に水を張る前に予めバフファタンク内の空気を真空ポンプ(型番:TA150XB)で引き抜いておく。そして圧縮層が成長した時点でバフファタンクとドレーンをつなぐバルブを開いて吸引を開始する。その後、吸引を続けることで洗浄装置内の水位が下がるため、基準面から10cm下がった時点で、バルブを閉めて吸引を停止させ、バフファタンク上部に取り付けたバルブを解放しタンク内の圧力を回復させると同時に内部の水を沈殿槽に戻すためのポンプを起動させ、吸入口周りの小部屋にタンク

ク内部の水を戻して、水位を回復させる。水位が回復したことを確認したらポンプを停止させ、再度、バフファタンクを負圧にし、吸引を再開する。それを装置が停止するまで繰り返す。

4. 実験結果および考察

土壌洗浄工程は、分級槽における土粒子の分級と沈殿槽における粘土・シルトの沈降および圧密に分けられる。沈殿槽に流入したフロックは傾斜板で沈降し沈殿槽底部にフロックの圧縮層を形成する。圧密を行わない場合は、圧縮層が厚くなり、最終的に沈殿槽から高濃度のフロックが流出する。沈殿槽内には流出口に向かう上昇流が存在するため、仕切り板を設置して槽内の流れをコントロールした。本章では、この流出口における濁水のSSを測定することで、積層傾斜板およびサクシオン圧密装置の効果を評価する。また、沈殿槽内沈殿物の粒度分布を計測することで、分級の精度についても検証する。

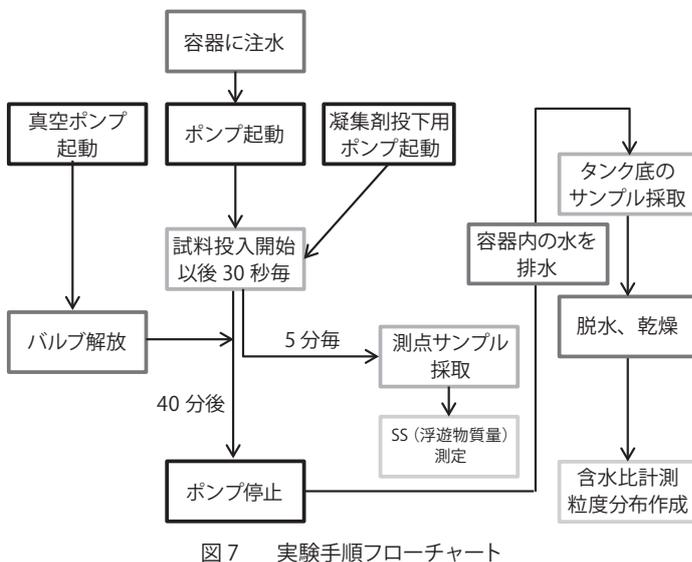


図7 実験手順フローチャート

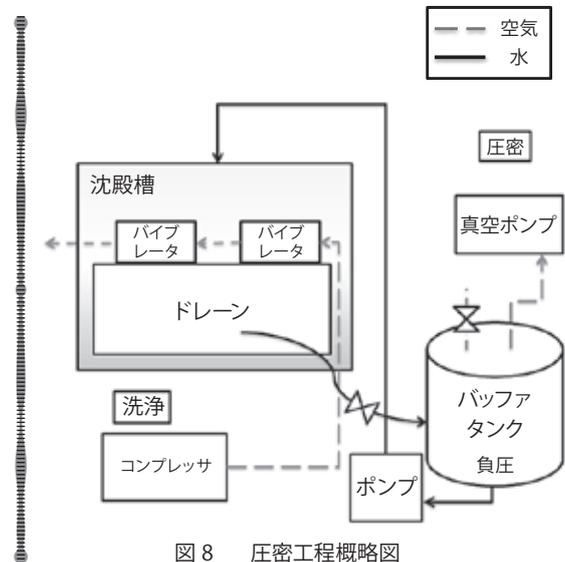


図8 圧密工程概略図

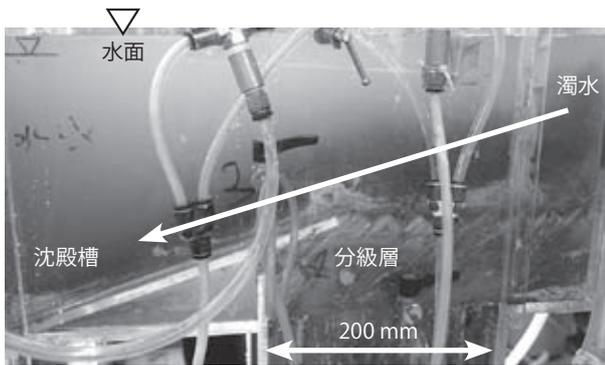


図9 分級層通過後の濁水

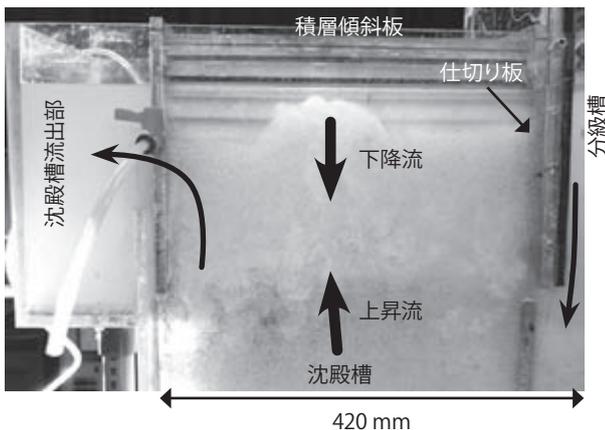


図10 仕切り板背後の積層傾斜板による流れ

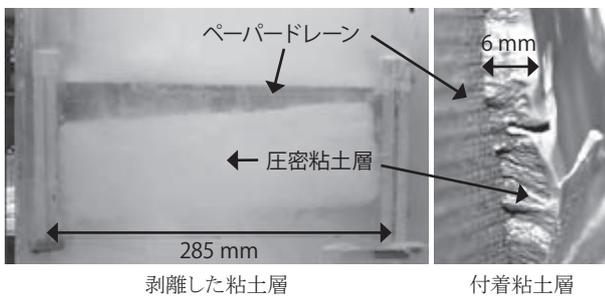


図11 沈殿槽底部のサクシオン圧密装置

(1) 土壌洗浄装置内の流況

本節では、本土壌洗浄装置内の流れについて説明する。

図9は分級層通過後の濁水を撮影したものである。濁水に無機凝集剤を混合することによって、フロック濁水と上澄み水の二層流れが発生する。このフロック濁水は、図左に設置されている沈殿槽に仕切り板に沿って流入する。

図10は沈殿槽上部を撮影したものである。右の分級槽からのフロック濁水は、仕切り板に沿って沈殿槽下部に流入する。その後、積層傾斜板を通過するうちに、高濃度のフロックは分離沈降し、同時にフロックが分離した水が上昇する。図10は、上昇する循環水によって巻き上げられたフロックが密度

成層によって抑えられている様子を示す。

図11右は、沈殿槽底部に設置したサクシオン圧密装置のペーパードレーンに吸引されたフロックが粘土層となって付着している様子を示す。また、図11左は、付着した粘土層が、サクシオン圧密装置に設置したパイプレタにより剥離離脱している様子を示す。このようにドレーン表面に付着した粘土が剥離されることは、本泥水処理装置を連続運用できることを示している。

(2) 沈殿槽流出口のSS

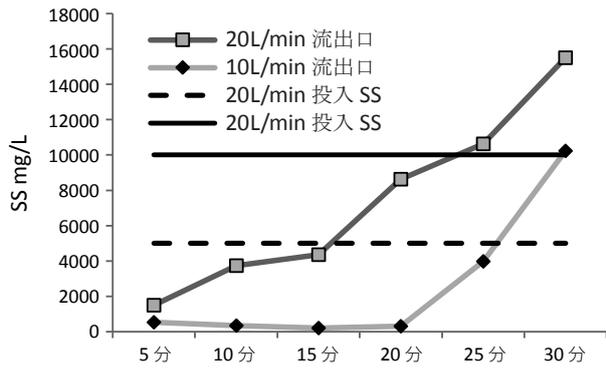
図12(a)、(b)は模擬土壌、12(c)は名古屋土壌の洗浄結果を示す。流出SSが小さいほど、泥水処理が効率的に行われており、かつ循環水濃度の変動が小さく、分級が安定的に行われていることを示している。

図12(a)は積層傾斜板を設置しない場合であり、早期に沈殿槽内の高濃度フロックが循環水に混入する状態になっている。この状態になると、循環水の濃度が上昇することで分級層を閾値以上の大きな粒径のものが突破する。図12(b)は、積層傾斜板を設置した場合であり、高濃度のフロックの流出時刻を遅延させることに成功した。しかし、積層傾斜板では沈殿したフロック圧縮層を圧密することはできないため、圧縮層が沈殿層上部まで成長した後は効果を発揮できないため、圧密装置が必要となる。

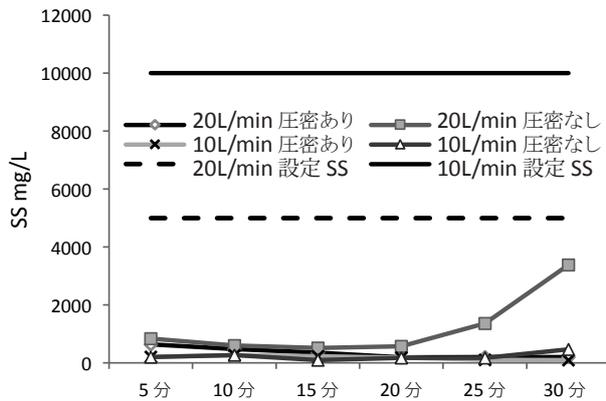
このフロック圧縮層の厚さを推定することで、フロックの流出時刻を予測することができる。実験終了後に沈殿槽から圧縮層のフロックを採取し、そのSSを測定した結果、54,350 mg/Lであった。この値から、本実験の投入土砂量に対応した単位時間当たりの圧縮層の体積増加量は1.84 L/minと推定される。つまり、サクシオン圧密装置の吸引流量は最低でもこの値を超える必要がある。吸引流量は実験動画から、自由水面の変化量を計測することで求めた。これより、本サクシオン圧密装置の吸引流量は、吸引直後では3.19 L/min、吸引が進んだ後では1.14 L/minであることがわかった。この結果から、長期運転のためにはペーパードレーンに付着した粘土層の剥離除去が必要であるということがわかる。

図12(c)は、名古屋土壌の洗浄実験結果を示す。名古屋港の土壌は圧密なしでもオーバーフローの心配がなく、泥水を安定的に処理できていることがわかる。先程と同様に沈殿槽から圧縮層のフロックを採取し、SSを測定した結果107,670 mg/Lであった。この値から、本実験による圧縮層の体積増加量は0.65 L/minとなる。この値と圧密装置のサクシオン流量を比較すると、圧密をすることで、さらに長期にわたって泥水を安定的に処理できることがわかる。名古屋土壌の場合は、模擬土壌と比べて粘土成分が少なく、シルトも含まれているため、生成したフロックの沈降速度が大きく泥水処理が容易である。

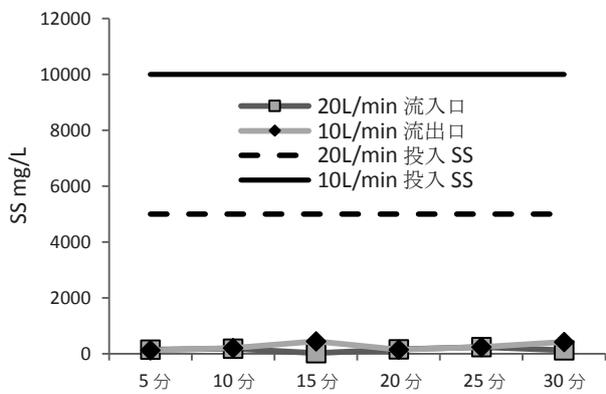
次に積層傾斜板の効果を分析するために、カオリンのメスシ



(a) 模擬土壌 積層傾斜板なし圧密なし



(b) 模擬土壌 積層傾斜板あり圧密なし



(c) 名古屋土壌 積層傾斜板あり

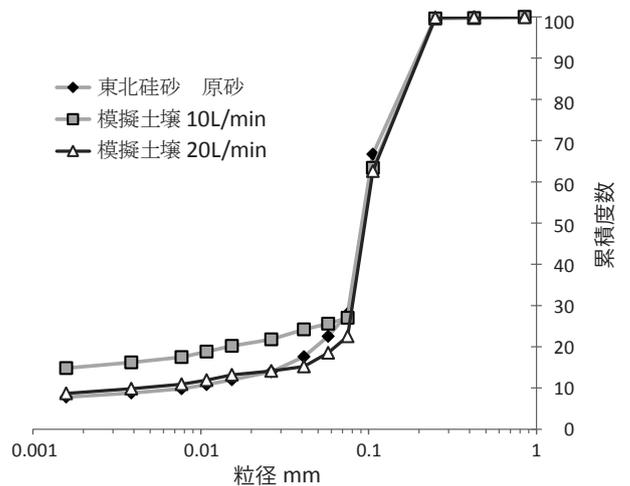
図 12 土壌の投入 SS と沈殿槽からの流出 SS

リンダー内および傾斜スリット間における沈降実験を行った。式 (1) の n の値を同定するためにメスシリンダー内にカオリン懸濁液を入れ、無機凝集剤を添加し、沈降層界面の沈下速度を濃度を変えて計測する。沈降実験の結果を示す両対数グラフの傾きから n の値は 46.2 となる。また、切片が 0 に

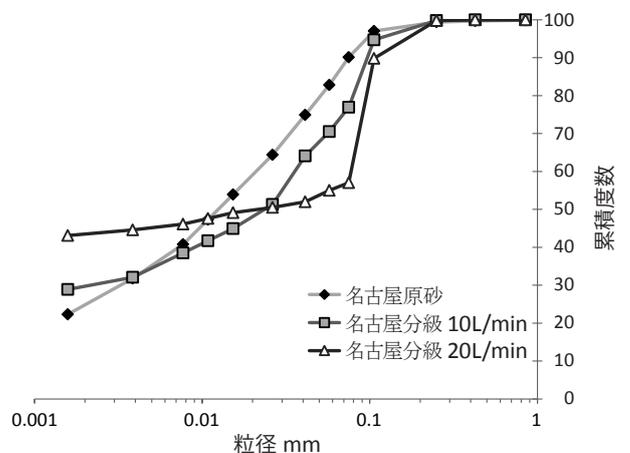
なるような、SS が 0 の粒子の沈降速度を求めると、その値は 3.19 mm/s となり、単一フロクの沈降速度と同オーダーであることを確かめた。同様の実験を、縦 210 mm 横 300 mm 外枠 35 mm、厚み 7 mm のアクリル板を縦 210 mm 横 300 mm 厚み 10 mm のアクリル板 2 枚で挟んだ水槽を 60° 傾けた状態で行った。以上の実験結果から傾斜平板による沈降速度の促進倍率を求めることができ、その平均の値は 1.59 倍、標準偏差は 0.44 倍であることがわかった。

(3) 分級槽および沈殿槽内の沈殿物の粒度分布

実験終了後に、分級槽および沈殿槽に残った沈殿物を採取し、重量および粒度分布を測定した。沈殿槽に移動した土壌量は、模擬土壌では、それぞれの流量で約 3.0 kg、名古屋土壌では、20L/min で約 2.0 kg、10L/min で約 1.8 kg であった。ただし、分級槽では、分級閾値以上の粒径の粒子のみが残



(a) 模擬土壌 粒度分布



(b) 名古屋土壌 粒度分布

図 13 分級槽沈殿物の粒度分布 (JISA1204 による)

存するはずであるが、ポンプ停止後にスタティックミキサーおよびハニカムに滞留していた土砂が沈降し、分級土砂のみを採取することができなかった。

図 13 は実験後に分級槽の底に残った土砂の粒度分布を示す。模擬土壌は粒径の大きな東北硅砂 ($D_{50} \sim 100 \mu\text{m}$) とカオリンの混合物であり、カオリンは粒径が数 μm のため分級槽を通過し、東北硅砂のみが分級を受ける。一方で、名古屋土壌は $100 \mu\text{m}$ 以下の粒子が連続的に存在しており、分級の閾値がより明確に現れることが期待される。

図 13 (a) より、模擬土壌については、粒径に大きな差異がみられない。この理由は、本模擬土壌では東北硅砂の比率が小さいため、分級の効果が顕著に現れなかったと考えられる。また、流量 20 L/min の粒径閾値が原砂の重量百分率が低い $75 \mu\text{m}$ 以下であり、粒度分布を原砂と比較すると差異が微小であったことも一因である。また、流量 10 L/min の粒度分布を原砂と比較すると、洗浄後の砂に粒径の小さな粒子が多く含まれることがわかる。この理由を調べるために、ポンプ停止直後の分級層内の SS を流量別に測定した結果、 10 L/min で 4090 mg/L 、 20 L/min で 830 mg/L であった。この SS は、主に模擬土壌中のカオリンであり、流量が小さい場合に分級槽により多く滞留したと考えられる。一方、模擬土壌中の東北硅砂の分級による粒径閾値は、別途東北硅砂のみで実験を行った結果、流量 20 L/min で約 $80 \mu\text{m}$ 、 10 L/min で約 $60 \mu\text{m}$ であった。

図 13 (b) より、名古屋土壌については、流量 20 L/min の粒度分布を原砂と比較すると、本実験における粒径閾値は $d = 75 \mu\text{m}$ であると推定される。この結果は、予測閾値以上の粒径粒子が沈殿槽に流出していることを示す。その理由として、傾斜管路内の土砂が時間とともに蓄積し、傾斜管路内の局所的な流速が高まることによって閾値を超える粒径が突破したと考えられる。この現象は傾斜管路の幅や角度を変化させることで改善が期待される。

図 14 は、名古屋土壌について、実験後に沈殿槽の底に残った土砂の粒度分布を示す。分級槽沈殿物の粒度分布 (図 13 (b)) より、沈殿槽には粒径が $75 \mu\text{m}$ 程度以下の粒子が連続的に分布するはずである。ところが、計測結果によれば、流量が 20 L/min の場合には、原砂よりも沈殿層の沈殿砂の方が、粒径が大きい方にシフトし、さらに、流量が 10 L/min の場合にも、粒径が $1 \mu\text{m}$ 以下の粒子が容積のほとんどを占める結果となった。以上の結果は、原砂の粒度分布に矛盾するため、計測時に試料中のフロックを十分分散しなかったために生じた測定誤差と考えられる。これらの不具合は、フロック混じりの土壌の粒度分布計測の困難さを示すと考えられる。

(4) サクション圧密による含水比

サクション圧密装置による効果を評価するために実験後に圧密装置を取り出し、ドレーンの不織布周りに付着した粘土層

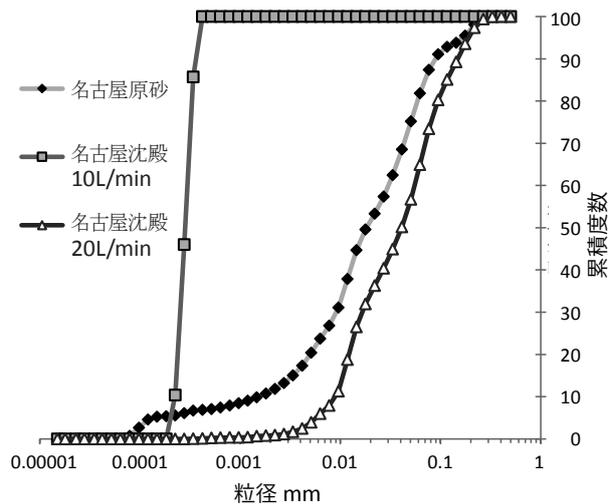


図 14 沈殿槽沈殿物の粒度分布 (レーザー回折法による)

の含水比を測定した。また、名古屋土壌を用いた洗浄実験では圧密装置を起動させなかったため、別途、沈殿槽のみを懸濁液で満たし吸引を行って吸引流量と不織布周りの粘土の含水比を測定した。名古屋港の粘土での吸引流量は吸引直後で 2.79 L/min 、吸引が進んだ場合では 0.98 L/min であることがわかった。

最後に、表 3 は模擬土壌と名古屋土壌の圧密土の含水比、および、実験終了後の底に溜まった圧縮土を 1 日置いて採取し、その含水比を調べたものである。カオリンの液性限界値が約 48% 、一般的な粘土の液性限界値が約 $50 \sim 80 \%$ であることから、今回圧密した粘土塊では運搬に適さず、別途、脱水工程が必要であると考えられる。

5. 結論

水力学的分級とサクション圧密に基づく土壌洗浄装置を開発し、本装置における分級および泥水処理の特性を実験的に調べた。結果的に、分級に関しては粒径が $10 \mu\text{m}$ オーダーの範囲で設定した粒径閾値での分級が可能であった。また、分級層の傾斜管路の大きさを最適化することで、さらなる改善が見込まれることが分かった。また、泥水処理では、積層傾斜板およびサクション圧密装置を設置することにより、沈殿槽流出口における濁水の SS を数百 mg/L オーダーで安定させることができた。さらに、サクション圧密装置のペーパードレーンに付着した粘土層をパイプレタで剥離可能であること、粘土層の含水比は $110 \sim 120 \%$ 程度であることを確認した。一方で、分級層の斜めハニカムに細粒土が堆積し、その堆積物で流路が狭くなると、粒径が大きな土砂が分級層を通過する可能性があることが示唆された。この不具合を解消するためには、分級層の斜めハニカムの傾斜角 θ を大きくすること、およびハニカムのセルサイズ b および長さ L を大きくすることが

表3 粘土含水比

	湿潤重量 g	乾燥重量 g	水重量 g	含水比 %	含水率 %
名古屋圧密土	320.9	142.1	178.8	125.8	55.7
模擬土壌圧密土	68.3	32.5	35.8	110.2	52.4
名古屋圧縮土	124.3	36.2	88.1	243.4	70.9
模擬土壌圧縮土	138.1	17.1	121.0	708.3	87.6

有効であると考えられる。また、装置稼働中に洗浄土を回収する機構の開発を必要とする。

湿式分級による除染効果に関しては、グランドの除染土壌(6,000Bq/kg)の放射能濃度の測定事例^{1),6)}では、放射能濃度は粒径の累乗に反比例して増加し、細砂(75~250 μ m)で2,000Bq/kg、細粒分(75 μ m以下)で20,000Bq/kg以上を示した。これは、原土の放射能濃度にもよるが、分級閾値が75 μ mより小さいと分級物の放射能濃度が急激に上昇することを示しており、除染土壌の放射能濃度が数千Bq/kg程度では、分級物の有効利用を視野に入れると75 μ mの分級閾値の設定は有効と考えている。

謝 辞

佐藤工業株式会社技術研究所 前田 幸男様、歌川 紀之様には、土壌試験および圧密などについてご教授を賜りました。また、多木化学株式会社様よりPAC、前田工織株式会社様より各種ドレーンをご提供いただきました。ここに、感謝の意を表します。なお、本研究は筑波大学東日本大震災復興・再生支援プログラムの補助を受けたことを付記致します。

参 考 文 献

- 1) 前田 幸男、辻野 修一、歌川 紀之、楠岡 弘康、片野 富雄、伊藤 敬慶、木俣 陽一、京藤 敏達：高性能洗

浄装置を用いた放射能汚染土壌の除染および減容化技術。佐藤工業技術研究所報、**37**, 45-52 (2012)

- 2) J. Garside and M. R. Al-Dibouni: Velocity-voidage relationship for fluidization and sedimentation in solid-liquid systems. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **16**, 206-214 (1977)
- 3) 山下 祥平、京藤 敏達：放射能汚染土壌の湿式分級による減容化に関する研究。混相流シンポジウム 2014、B153 (2014)
- 4) H. Tsukada, A. Takeda, S. Hisamatsu, J. Inaba: Concentration and specific activity of fallout ¹³⁷Cs in extracted and particle-size fractions of cultivated soils. *J. Environ. Radioactiv.*, **99**, 875-881 (2008)
- 5) W. D. Hill, R. R. Rothfus, K. Li: Boundary-enhanced sedimentation due to settling convection. *Int. J. Multiphas. Flow*, **3**, 561-583 (1977)
- 6) 辻野 修一、前田 幸男、歌川 紀之、楠岡 弘康、森 晴夫：放射能汚染土壌の除染・減容化システムの開発。土木学会第 68 回年次学術講演会、CS11-006, 11-12 (2013)

2015年1月4日受付

2015年2月9日受理

和 文 要 約

本研究の目的は、汚染土壌の減容化を行う簡易で実用的な湿式分級装置の開発である。従来の装置との違いは、ふるい分級を水力的分級で置き換え、泥水処理を沈降槽内のサクシオン圧密装置で行なう点である。水力的分級によれば、大量の土壌を連続的に分級することができ、また、沈降槽内で圧縮フロックを圧密することで、高分子凝集剤を添加せずに圧密が可能となり減容化率の向上を計ることができる。本装置の性能を評価するために、模擬土壌および実際の土壌の洗浄実験を行った。まず、分級に関しては粒径が10 μ mオーダーの範囲で設定した粒径閾値での分級が可能であった。一方で、分級層の傾斜管路の大きさを最適化することで、分級精度の改善が見込まれることが分かった。また、泥水処理では、積層傾斜板およびサクシオン圧密装置を設置することにより、沈降槽流出口における濁水のSSを数百mg/Lオーダーで安定させることができた。さらに、サクシオン圧密装置のペーパードレーンに付着した粘土層をパイプレータで剥離可能であること、粘土層の含水比は110%~120%程度であることを確認した。