

土壌洗浄法による重金属汚染土壌の処理に関する研究

野 田 兼 司 小 口 深 志
山 本 達 生 高 橋 和 夫^{*1}

要 旨

土壌汚染の問題が顕在化する中、種々の土壌浄化方法について研究開発がなされている。今回対象とした重金属汚染土壌の浄化方法には、固化不溶化技術、熱処理技術などがあり、土壌洗浄法もその中の技術の一つである。

土壌洗浄法は「解砕」「洗浄」「分級」の工程からなり、汚染の濃縮した細粒分を処理し、汚染物質濃度が低い粗粒分を再利用することを基本とする浄化技術である。

本報では、実際の汚染土壌を用い、土壌洗浄法の適用性や効果を把握するために湿式分級試験、室内個別工程実験を実施し、汚染物質の細粒分への濃縮現象のあることやサイクロンが洗浄効果を高めることを確認した。さらに汎用土木機械を組み合わせ土壌洗浄システムを構築し、実大実験を行い、その効果を確認した。

キーワード 土壌汚染／重金属／土壌洗浄／サイクロン／実大実験

目 次

- | | |
|----------------------|-----------------|
| 1. はじめに | 5. 実大実験 |
| 2. 土壌洗浄の概念およびシステムフロー | 6. 室内実験と実大実験の比較 |
| 3. 湿式分級効果確認実験 | 7. まとめ |
| 4. 工程別効果確認実験 | 8. おわりに |

A STUDY ABOUT TREATMENT OF HEAVY METAL CONTAMINATION SOIL BY SOIL WASHING

Kenji NODA Fukashi OGUCHI
Tatsuo YAMAMOTO Kazuo TAKAHASHI

Synopsis:

Research and development is done about various kinds of soil purifying method while a problem of land pollution clearly exists. A remediation technology of heavy metal pollution soil includes a solidification/stabilization, a heat treatment. A soil washing is one of a remediation technology of heavy metal pollution soil.

A soil washing processes the fine-grain fraction which contamination concentrated from stage of execution works of "cracking" "washing" "classification", and it is basis and a remediation technology to do in pollutant density recycling low coarse grain minute.

With this report, real contamination soil was used, and a wet classification test, individual treatment stage of execution works test in room were executed in order to grasp applicability and an effect of a soil washing. The soil washing confirmed that there was an enrichment phenomenon to fine-grain fraction of contaminant. In addition, it was confirmed that a cyclone raised cleaning effect. More general-purpose civil engineering machine was put together, and soil washing system was built, and full scale experiment was done, and the effect was confirmed.

*1 本店 土木本部 土木エンジニアリング部

1. はじめに

近年の工場跡地等の再開発・売却に伴う土壌調査の事例の増加や事業者の環境管理等の一環（ISO14001 への取り組みなど）としての自主的な調査および地方自治体独自の条例・要綱等に基づく土壌調査等により土壌汚染の問題が顕在化している。土壌環境センターの調査報告によると、全国に浄化作業が必要な場所が数十万件にもおよぶと試算されている¹⁾。これらの背景のもと、種々の土壌浄化方法について研究開発がなされている。今回対象としている重金属汚染の浄化方法には、表-1 に示すような種々の方法が採用される²⁾。その中でも汚染原因物質を系外除去し、かつ土壌の有効利用を図り最終処分場への投棄量を減少させる技術の開発が望まれている。このような状況の中、汚染土壌に水を添加して土壌を洗浄する「土壌洗浄法」は、汚染原因物質の除去と濃縮ができる可能性が高く、その適用性を検討して技術の導入を図ることは、トータルの処理コストの低減が図れ、対策工事受注に対しての競争力を高めることができると考えられる。そこで本研究では種々の汚染土壌に対して、土壌洗浄法の適用性を確認するとともに、汎用の機械を用いた安価な洗浄法の開発を目的として実施した。

表-1 重金属等に関する対策技術の分類

恒久対策	浄化	原位置 浄化	原位置 分解	汚染土壌・地下水に含まれる重金属等を地下（原位置）で分解する技術		
			原位置 抽出	汚染地下水又は土壌中の重金属等を地上に取り除く技術（技術例）地下水揚水	分解	重金属等に分類される対象物質のうち、シアン、農薬等の化合物を熱化学的に分解する技術（技術例）化学的分解、熱分解
		掘削除去	対象地から汚染土壌を掘削除去する技術			
	封じ込め		前処理		封じ込め	
		原位置 封じ込め	固型化 汚染土壌にセメント等の固型化剤を混合して固型化する技術	現場の土壌を移動せずに原位置で汚染土壌を封じ込める技術（技術例）不透水層と鋼矢板等による封じ込め		
掘削除去後 封じ込め		不溶化 汚染土壌に不溶化剤を混合し、難溶化する技術	土壌を一度掘削してから、改めて汚染土壌を封じ込める技術（技術例）遮断工、遮水工による封じ込め			

2. 土壌洗浄の概念およびシステムフロー

2.1 土壌洗浄の概念

重金属等が土中に浸透した場合、土粒子中で比表面積が大きく、イオン交換能力の高い粘土粒子（細粒分）に吸着する割合が大きいと言われている。また、ダストのような形態の汚染物質が混入している場合でもその粒径は小さい。

土壌洗浄法はこのような土壌の特徴を利用し、土壌を分級して汚染物質が濃縮している細粒分を分離するこ

とにより浄化することと同時に、汚染物質を洗浄液中に溶解させて浄化することが基本となっている。図-1 にその概念を示す。

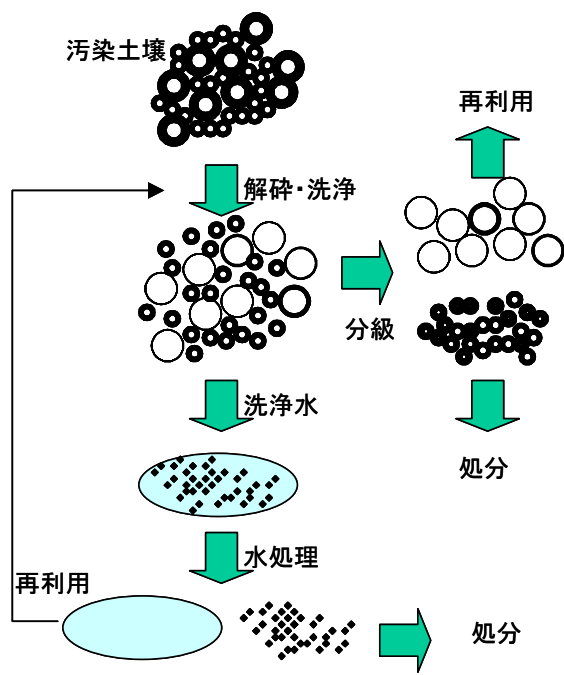


図-1 土壌洗浄の概念

洗浄の効果は汚染物質の種類・濃度ならびに土壌の粒度分布により左右される。汚染物質の濃縮された細粒分は不溶化等を行い管理型処分場へ処分する必要がある。洗浄法は、細粒分を多く含む土壌には一般的に不向きである。しかし、他の工法に比べて安価であるため、処分費との兼ね合いで選択されるべき技術と考えられる。また重金属のみならず、油や有機系塩素化合物の汚染にも適用可能な技術である。

1.3 土壌洗浄システムフロー

土壌洗浄法の概念より、土壌洗浄法的主要工程は、土壌の塊状物を砕く「解砕」、粒子表面から汚染物質を剥ぎ落とす「洗浄」、汚染物質の濃縮した細粒分と浄化された粗粒分を分ける「分級」である。今回、洗浄システムのフローを検討するにあたり、これらの工程を考慮して、汎用機械の組み合わせによるシステムを構築することとした。今回開発した土壌洗浄法のシステムフローを図2に示す。本フローの特徴は、本来分級のみに使用されるサイクロンを多数回通過させることにより洗浄の効果を高めようとした点である。

3. 湿式分級効果確認実験

3.1 実験方法

汚染土壌の水による分級での浄化の可能性および汚染物質の溶出状況を確認する目的で、乾式・湿式分級試験を行った。湿式分級は最も簡易な土壌洗浄法であり、

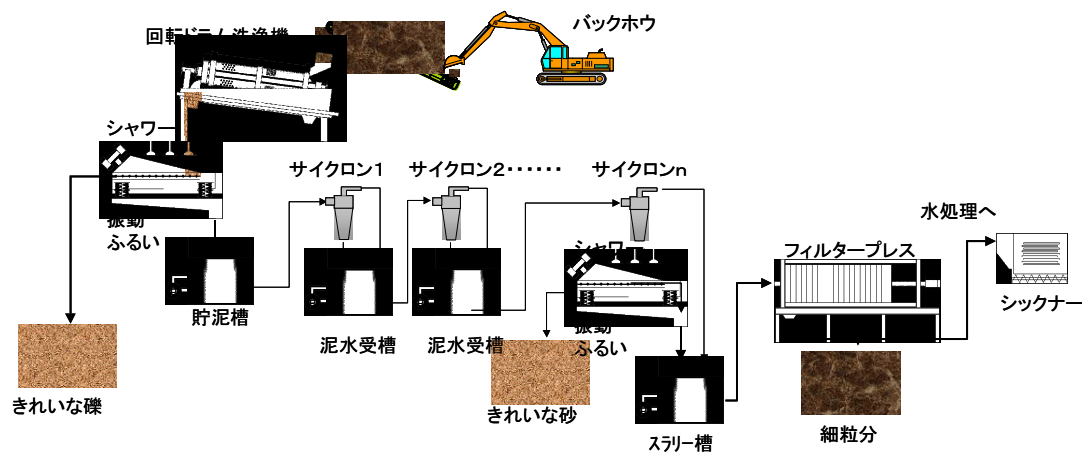


図-2 土壤洗浄法システムフロー

適用性試験（トリータビリティ試験）の方法になり得ると考えられる。分級は2mm, 0.425mm, 0.106mm, 0.075mmのふるいを用いて手作業で行い、分級後の汚染土壌の各粒度区分における重金属含有量・溶出量を分析した。実験に使用した土壌は、実汚染現場より採取してきた土壌を用いた。それぞれの試料名と汚染原因物質の一覧表を表-2に示す。

表-2 分級試験試料一覧

試料名	汚染原因物質
A	鉛(Pb)
B	六価クロム(CrVI)
C	砒素(As)
D	鉛(Pb), 砒素(As), カドミウム(Cd)
E	鉛(Pb), 砒素(As), カドミウム(Cd)
F	鉛(Pb), 砒素(As), カドミウム(Cd)
G	フッ素(F)

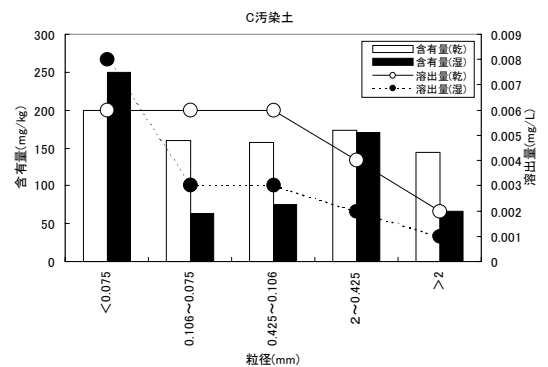


図-4 各粒度の含有量・溶出量変化(C汚染土)

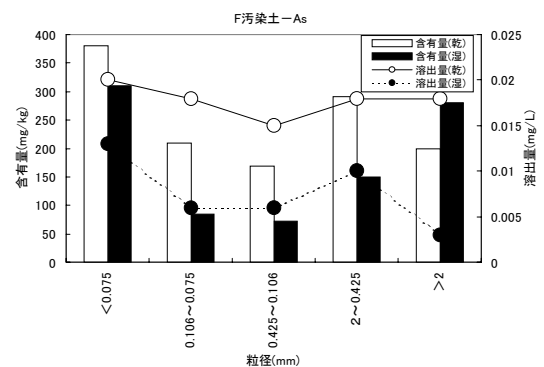


図-5 各粒度の含有量・溶出量変化(F汚染土-As)

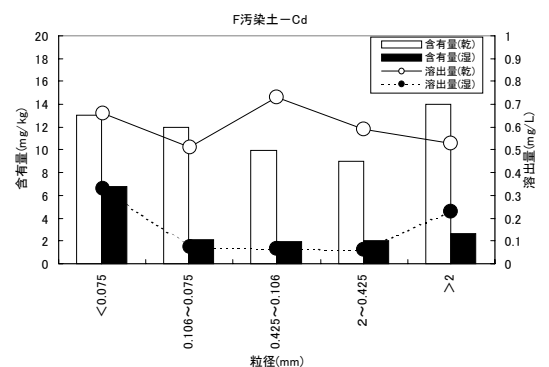


図-6 各粒度の含有量・溶出量変化(F汚染土-Cd)

3.2 実験結果

図-3～図-6に、乾式・湿式分級後の各粒度における汚染物質含有量・溶出量の分析結果の一例をグラフに示す。図に示すように湿式分級を実施することにより、乾式分級よりも汚染物質含有量・溶出量は、ともに小さくなる傾向が見られる。

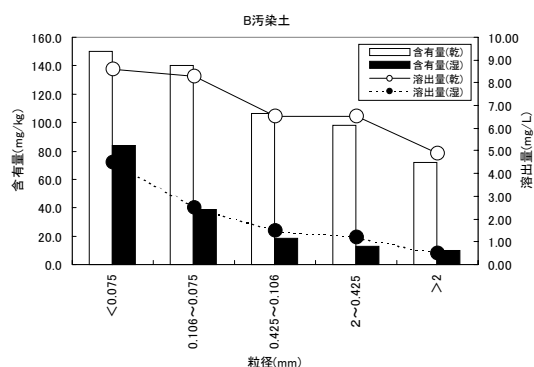


図-3 各粒度の含有量・溶出量変化(B汚染土)

図-7 は、全試料について乾式・湿式分級の粒径別の物質質量変化図である（物質質量＝各粒度区分含有量(mg/kg)×各粒度区分重量(kg)）。縦軸は各粒度区分毎の乾式分級に対する湿式分級の物質総量の比を表しており、1 以上では濃縮、1 以下では洗浄効果があったことを示す。図より粒径の大きい方で洗浄効果が高く、0.075mm 以下の粒径では濃縮されていることがわかる。

また、図-8 に粒径別の溶出量比を示す。溶出量は含有量とは異なり、粒径による洗浄・濃縮効果が表れることはないようである。

このことより、0.075mm での分級を実施することで 0.075mm 以上の土壌については全体的な含有量を低減することができる。その一例を図-9 に示す。これは、F 汚染土において原土壌の物質質量を 1 とした場合の湿式分級により粒径 0.075mm 未満の土壌を除去した場合の物質質量比を示す。湿式分級で約 50～60%の物質が除去されたことになり、土壌洗浄法が汚染物除去の方法に効果的であることを確認した。

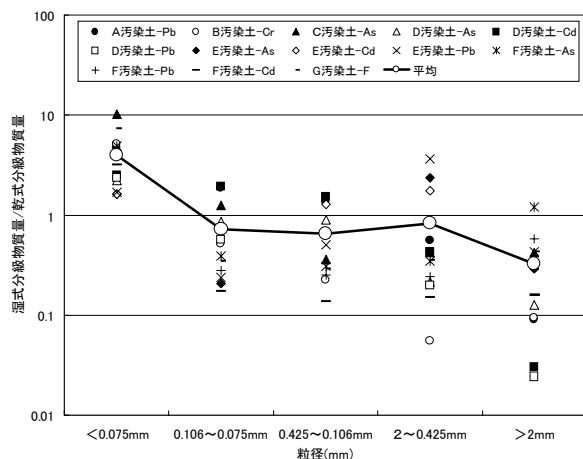


図-7 粒度毎の乾式湿式分級による物質質量比

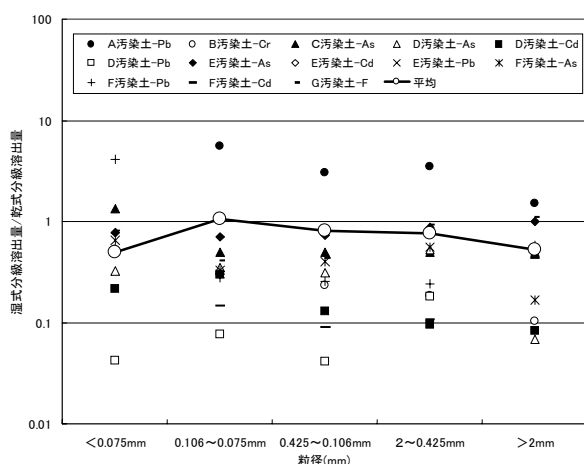


図-8 粒度毎の乾式湿式分級による溶出量比

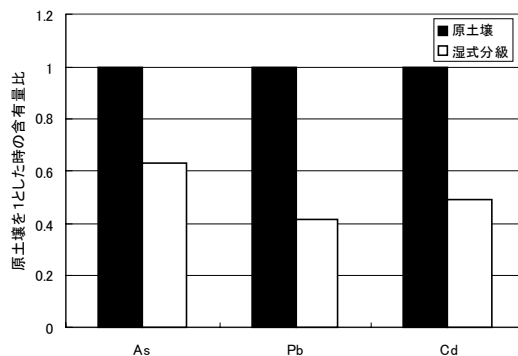


図-9 湿式分級による 0.075mm 以上土壌の物質質量低減の一例

4. 工程別効果確認実験

土壌洗浄法の主な工程は、「解砕」、「洗浄」および「分級」工程である。今回検討したフローでは、解砕・洗浄工程は回転ドラム洗浄機、分級工程は振動ふるい・サイクロンにあたると思われる。サイクロンは図-10 に示すように、内部で渦流を発生させ上部から細粒分、下部から粗粒分を排出し分級する仕組みになっており、内部では大きな遠心力が働いている。その遠心力により発生する壁面摩擦によりサイクロンでも洗浄効果も期待している。「分級」による粗粒分での汚染物質低減効果は、湿式分級試験において確認した。次に「洗浄」による汚染物含有量の低減効果を確認するため簡易な実験装置を用い実験を行った。洗浄効果は 0.075mm 以上の粗粒分において期待するため、評価は 0.075mm 未満の土を除去して行った。

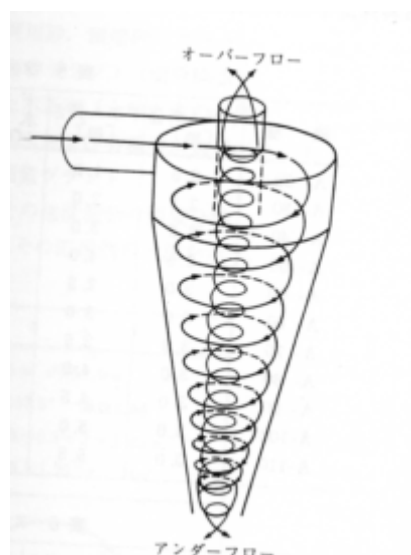


図-10 サイクロン概念図³⁾

4.1 実験方法

回転ドラム洗浄機の代わりに可傾式ミキサを使用し、サイクロンは小型のものを使用してそれぞれ含有量低減効果を確認することとした。可傾式ミキサ、サイクロ

ンにより洗浄した試料は、0.075mm ふるい上で水洗いをして分析を行った。なお、試料は湿式分級試験で使した F 汚染土壌を使用した。

4.2 実験結果

(1) 可傾式ミキサ実験

図-11 に原土壌の汚染物質含有量を 1 としたときの洗浄後の含有量を比で表す。同じ図中に湿式分級における含有量比も示す。含有量は湿式分級とほぼ同等であり、可傾式ミキサは、分級のための土塊の解砕は湿式分級と同程度の能力があるが、汚染物質を剥ぎ落とすという効果は、あまり期待できないという結果になった。

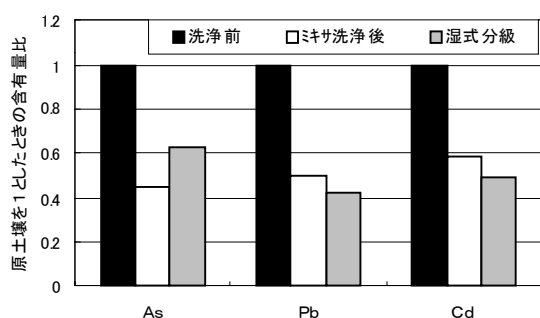


図-11 可傾式ミキサによる 0.075mm 以上粒径の含有量変化

(2) サイクロン実験

図-12 に原土壌の汚染物質含有量を 1 としたときのサイクロン通過後のサイクロンアンダー (粒径 0.075mm 以上) の含有量を比で表す。同じ図中に湿式分級における 0.075mm 以下を除去した場合の含有量比も示す。湿式分級によって単に 0.075mm を分離するよりも、サイクロンを通してることにより含有量の減少程度は大きくなっておりサイクロン通過による擦洗効果があると考えられる。

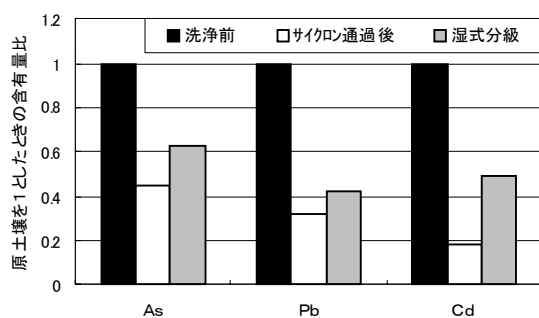


図-12 サイクロンによる 0.075mm 以上粒径の含有量変化

5. 実大実験

検討したフローでの洗浄効果を確認するため実大規模での実験を行った。図-2 のシステムフローに基づき機器

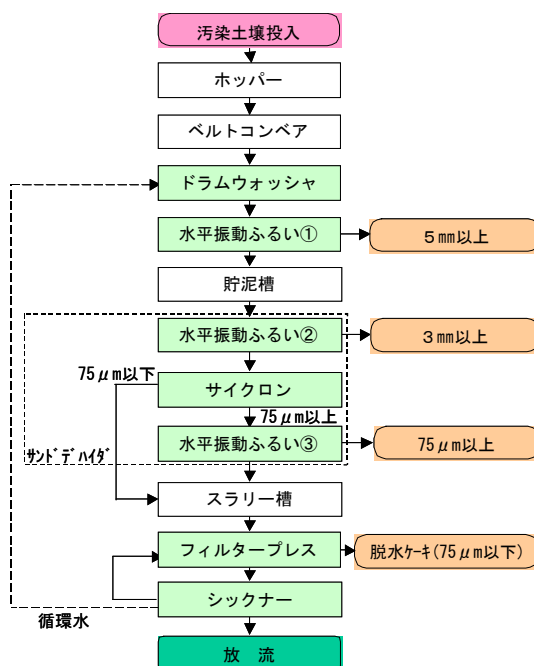


図-13 機器フロー図



写真-1 プラント全景

を選定した。図-13 に機器フロー図、写真-1 にプラントの全景を示す。

5.1 実験条件

実大実験では F 汚染土壌および G 汚染土壌を使用した。ドラムウォッシャでの攪拌時間、固液比およびサイクロン通過回数をパラメータとし実験を行った。ケースを表-3 に示す。

表-3 実大実験ケース

Case	ドラムウォッシャ		サイクロン 通過回数(回)
	固液比	攪拌時間(分)	
Case S1	1:1.0	2	4
Case S2	1:1.5	2	4
Case S3	1:0.5	2	4
Case S4	1:1.0	1	2
Case S5	1:1.0	4	1
Case T1	1:1.0	2	4

5.2 実験結果

(1) 洗浄・分級後の産物の分析結果

図-14 に Case S1, T1 での各産物の汚染物質溶出量比を、

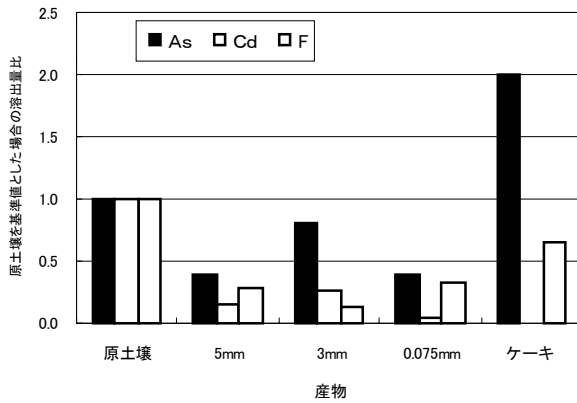


図-14 各産物の溶出量比(Case S1,T1)

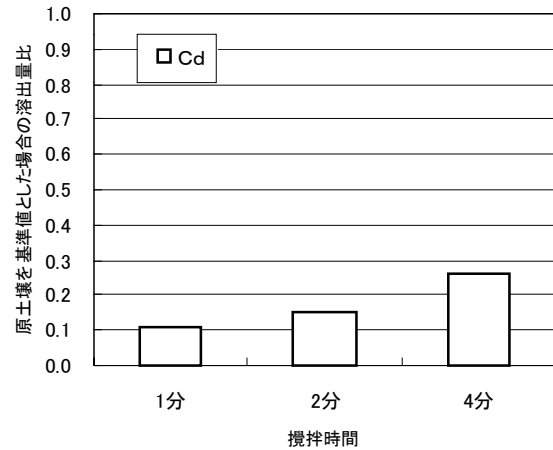


図-16 攪拌時間と溶出量比の関係

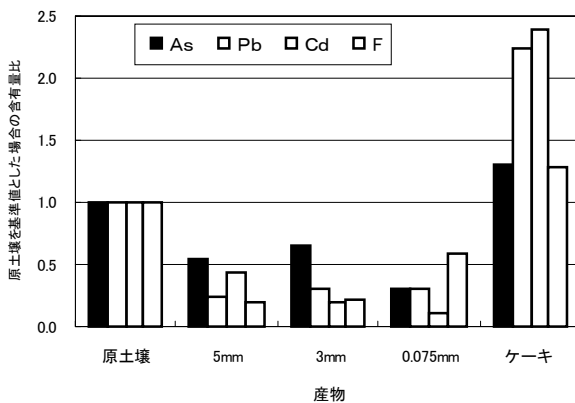


図-15 各産物の含有量比(Case S1,T1)

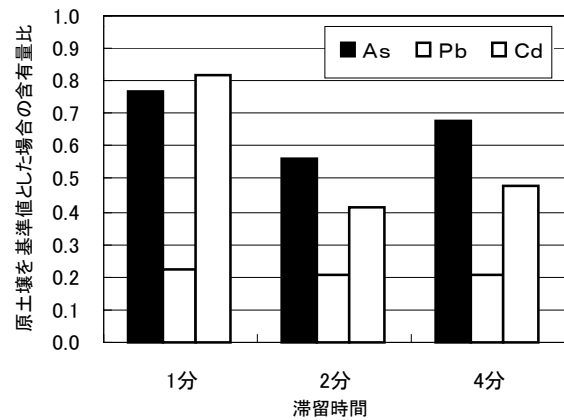


図-17 攪拌時間と含有量比の関係

図-15 に汚染物質含有量比を示す。それぞれ原土壌の汚染物質溶出量・含有量を1としている。なお、Pbにおける溶出量が分析での検出限界値付近であったため、図-14には示していない。溶出量、含有量ともに、多少のバラつきがあるものの、粒径 $75\mu\text{m}$ 以上の全ての産物は原土壌の $1/2$ 以下に低減されている。一方、細粒分を回収した粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の産物（脱水ケーキ）ではCdを除いて汚染物質が濃縮されていることがわかる。Cdの溶出量比がほぼ0になっているのはフィルタープレスへの打ち込み前にpH調整の目的で投入したセメントの影響により不溶化されたためだと考えられる。

(2) 攪拌時間との関係

攪拌時間をパラメータとしたケース Case S1, S4, S5における粒径 5mm 以上の産物の汚染物質溶出量比、含有量比を図-16, 17に示す。原土壌の溶出量・含有量をそれぞれ1としている。As, Pbの溶出量比は、ともに分析の検出限界付近であったため除外した。

Cdの溶出量比は、攪拌時間の増加とともに増加する傾向がみられるが、大きな差ではないと思われる。含有量比は、攪拌時間を2分以上に増加させても大きな低減効果が生じないことがわかった。

(3) 固液比との関係

固液比をパラメータとした Case S1, S2, S3における粒径 5mm 以上の産物の汚染物質溶出量比、含有量比を図-18, 19に示す。原土壌の溶出量・含有量をそれぞれ1としている。As, Pbの溶出量比は、ともに分析の検出限界付近であったため除外した。

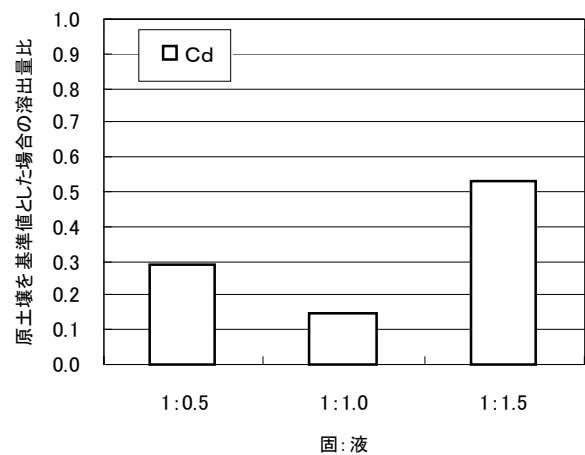


図-18 固液比と溶出量比の関係

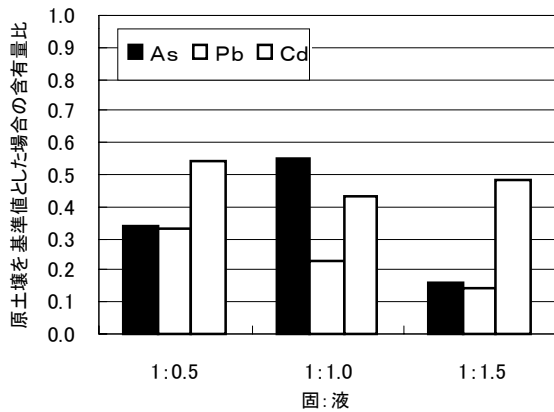


図-19 固液比と含有量比の関係

Cdの溶出量比は、固液比の違いによる傾向が見られなかった。また、含有量については、データのばらつきはあるものの含有量を低減するためには水を多くする必要があることがわかった。

(4) サイクロン通過回数との関係

サイクロン通過回数をパラメータとした Case S1, S4, S5, T1 における汚染物質の溶出量比、含有量比の結果を図-20, 21 に示す。これはサイクロン通過後の粒径 $75\mu\text{m}$ 以上の産物の分析結果を、サイクロン投入前の値で除

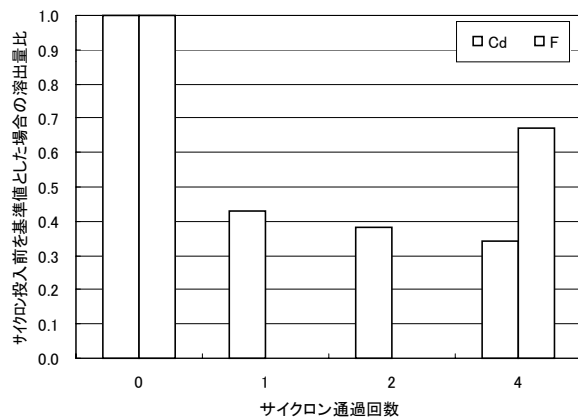


図-20 サイクロン通過回数と溶出量比の関係

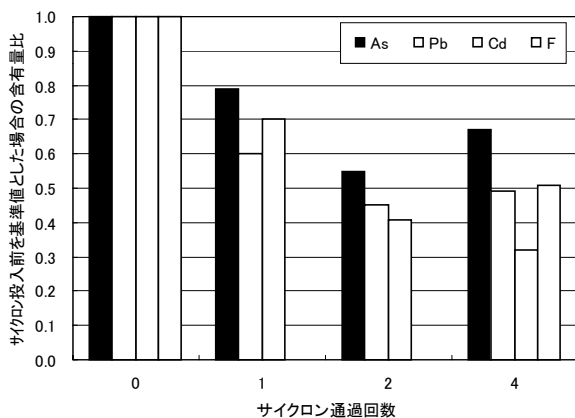


図-21 サイクロン通過回数と含有量比の関係

したものである。なお As, Pb の溶出量が検出限界値程度であったため溶出量比は示していない。サイクロンの通過回数が増加することにより、溶出量、含有量が減少することがわかった。

6. 室内実験と実大実験の比較

湿式分級効果確認実験、工程別効果確認実験と実大実験で得られた、含有量比の比較を行った。

図-22 に実大実験 (Case1) と湿式分級実験およびサイクロン実験の汚染物質の含有量比を示す。すべて 0.075mm 以上の粗粒分の含有量の変化を示す。

図から、サイクロン実験結果では、含有量の低減を良く再現しているが、カドミウムについては下回る結果となっており、実際の処理を考えた上では危険側の判断を下しかねない。湿式分級では、含有量の低減を少なく見積もる傾向があるが全て安全側の評価となる。このことより、湿式分級は土壌洗浄後の含有量をおおまかに把握するためには効果的な方法であり、土壌洗浄法の適用性を判断するための試験方法として活用できると思われる。

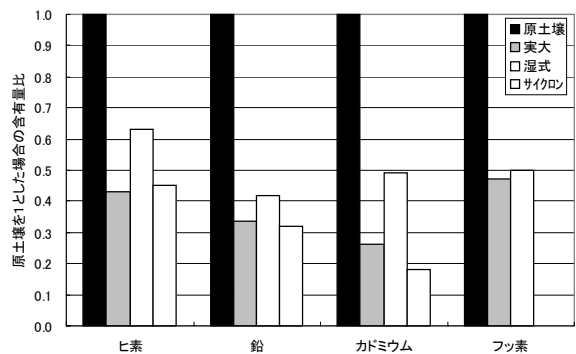


図-22 実大実験と湿式分級の含有量比の比較

7. まとめ

汚染土壌の浄化技術の一つである土壌洗浄法について、実汚染土壌を用いた分級試験・洗浄効果確認試験および実大実験を実施した。その結果以下のことがわかった。

①重金属により汚染された土壌を水による分級操作により、汚染物質は細粒分の方へ濃縮され、効果的な分級点を見つけることにより含有量の低減は大きくなる。

②サイクロンでは擦洗による洗浄効果が期待できる。

③実大実験においてドラムウォッシャでの攪拌時間は2分程度、固液比は固:液=1:1.5、サイクロンの通過回数は2回程度で十分である。

④湿式分級のような簡易な事前試験により、実大洗浄プラントでの洗浄効果がある程度推定可能である。

⑤汎用機械の組合せによる洗浄で十分浄化できる可能性がある。

8. おわりに

今回使用したシステムフローに基づき 30t/h の処理能力のある機械を全てリースするとしてコスト試算を行うと、処理規模や土壌中の細粒分の含有量により異なるが概ね従来の 40～80% (約 15,000 円/m³～30,000 円/m³) 程度の処理費用になると算出された。このように土壌洗浄法は、土質（特に細粒分含有量）により適用性の可否が決定する。今後、この適用性を判断する試験方法の確立や適用土質範囲を広げるための細粒分からの効率的な汚染物質の除去方法などが課題である。また、最近徐々に問題となりつつある油汚染土壌は、現在法規制は無いが、近々規制される動きがあり、さらに問題が顕在化してくると思われる。土壌洗浄法は、このような油汚染土壌に対しても効果的であるため適用拡大についての研究を進める必要がある。

謝辞：本研究は若潮会（㈱錢高組，日立造船㈱）での共同研究であり，㈱錢高組，日立造船㈱、各位には，多大なるご協力をいただいた。また，実大実験では，ラサ機工㈱に，大変ご尽力いただいた。末筆ながら，ここに深く感謝の意を表するものである。

参考文献

- 1)山本 勇：我が国における土壌汚染対策費用の推定
第3回 国際土壌・地下水環境ワークショップ，
pp25-27，2000.
- 2)環境庁水質保全局：土壌・地下水汚染に係る調査・
対策指針および運用基準，1999.
- 3)日本粉体工業協会編：分級装置技術便覧，p330，1978.