

## 鉛汚染土の分級洗浄処理の適用事例と品質管理手法の検討

三浦俊彦 井出一貴 岡本英靖  
(本社土木技術本部)  
佐藤久美子 新村亮 久保博

### Washing Remediation of Pb Contaminated Soil and Evaluation of Quality Control Techniques for Washed Soil

Toshihiko Miura Kazuki Ide Hideyasu Okamoto  
Kumiko Sato Akira Shimmura Hiroshi Kubo

#### Abstract

Soil washing treatment was executed for remediation of Pb contaminated soil at redevelopment site. Laboratory tests showed this soil had a lot of Pb in fine soil particles and both Pb content and water-soluble Pb were below a standard value in the coarser sand than 0.075mm. Therefore, washing system including precise classifier was constructed. The washed sands were sampled from the system and their quality was investigated. The results showed that the system was able to achieve the fine grain rate of 1% or less in washed sand, and Pb content and water-soluble Pb of washed sand were below a standard values regularly. The simple rapid test techniques were examined to evaluate residual ratio of fine grain in washed sand using turbidity and the Pb content and water-soluble Pb using X-ray fluorescence. The accuracy of residual rate of fine grain calculated from turbidity was 1%. The content and water-soluble Pb could be accurately analyzed by the X-ray fluorescence method in combination with the adsorption material.

#### 概要

某現場における鉛汚染土の洗浄浄化を目的として、室内トリータビリティー試験と土中鉛の存在形態調査を実施した。本現場の鉛汚染土は、細粒分に鉛が多く存在し、0.075mm以上の砂は含有量と溶出量ともに基準値以下であったため、0.075mmを分級点として分級洗浄を行なうこととした。現場施工中に洗浄砂を採取し、細粒分の残存率や鉛含有量等の品質を調査した結果、細粒分残存率は1%以下で、含有量と溶出量は基準値以下を達成することを確認した。また、洗浄砂の簡易で迅速な品質調査を目的として、濁度計を利用した細粒分の残存率と、蛍光X線を用いた鉛含有量と溶出量の簡易分析手法を検討した。濁度による残存率測定法は、定量限界1%以上で分析が可能であった。蛍光X線を用いた鉛含有量と溶出量の簡易分析は、吸着材と組み合わせることで精度の良い分析が可能となった。

#### 1. はじめに

重金属汚染土から重金属を除去する方法として、分級洗浄処理が一般に行なわれている。この方法は、土中の重金属が細粒分に多く存在している性質を利用して、汚染土を湿式分級により、きれいな砂と汚れた細粒分に分ける方法である<sup>1)</sup>。分級洗浄処理は、確立された方法であるが、汚染土の性状は現場ごとに異なっているため、事前の試験による詳細な検討が重要である。

対象の汚染土が、分級洗浄を適用できるかを判定するには、室内トリータビリティー試験を実施する。トリータビリティー試験は、湿式分級による粒径ごとの重金属溶出量と含有量を調べる試験である。分級後に得られた砂の溶出量と含有量が、環境基準値、含有量基準値を達成していれば適用可能と判断される。また、土中重金属の存在形態を調べることも重要である。単純な分級だけではなく、摩砕や比重選別の工程を加えることにより、洗浄砂の品質が向

上するかどうかを検討できる。これらの結果から、最も効率よく浄化できる分級洗浄システムを検討し、現場における洗浄プラントの構成や規模等を具体的に設計・計画する。

本報告は、某サイトの鉛汚染土を対象に、室内トリータビリティー試験と、EPMA解析と逐次抽出法による土中鉛の存在形態調査を行った結果を述べる。これらの結果をもとに、分級洗浄システムを構築し、浄化工事を実施したが、浄化効果を確認するため、施工期間中に洗浄砂を採取して、品質（細粒分の残存率と鉛溶出量、鉛含有量）調査を実施した。また、洗浄砂の品質を簡易・迅速に測定するための簡易分析法の検討も行ったので、その結果を報告する。

#### 2. 分級洗浄処理の概要

分級洗浄処理の概要をFig. 1に示す。土中の重金属は様々な形態で存在しているが、吸着や沈殿等により土粒子表面へ付着して存在している場合が多い。細粒分は単位重

量当りの表面積が大きいため、重金属量の付着量が多く、砂分は少ない傾向にある。分級洗浄は、湿式分級により重金属付着量の多い細粒分を分離・除去し、重金属付着量の少ない砂を健全土として有効利用する方法である。

分級点は0.075mmが一般的だが、トリータビリティ試験の結果から決定される。細粒分量が少ないほど、健全土として利用される砂量が増加するため、処理コストは安くなる。一方、細粒分量が多くなると脱水ケーキの処理コストが増えることから、粘性土には適用が難しい。分級洗浄の適用可否の目安は、細粒分量の割合が全体の4割以下とされている。また、分級しても砂の重金属含有量や溶出量が基準値よりも高い場合は、分級洗浄は適用できない。そのため、砂の重金属含有量と溶出量を低減して、分級洗浄の適用性を広げるため、湿式分級と摩砕や浮遊選鉱、比重選別、薬剤洗浄等を組み合わせる方法が提案されている<sup>2),3)</sup>。

### 3. 室内トリータビリティ試験

#### 3.1 目的

事前の汚染分布調査時に現場から採取した鉛汚染土を対象に、分級洗浄処理の適用性を調べた。

#### 3.2 試料土

Table 1に試料土の性状を示す。試験には汚染土2種類を使用した。汚染土Aは鉛含有量が210mg/kgと含有量基準(150mg/kg)を超えており、汚染土Bは鉛溶出量が0.033mg/Lと環境基準(0.01mg/L)を超えていた。両者とも、0.075mm以下の細粒分量が全体の2割程度の砂質土であった。

#### 3.3 試験方法

①試料土1kgを、水5Lを用いて各粒径の篩により丁寧に湿式分級を行った。②分級後、各粒径ごとに鉛の溶出量(環告46号)と含有量(環告19号)を測定した。

#### 3.4 結果と考察

Fig. 2に粒径ごとの鉛含有量と溶出量を示す。汚染土Aの鉛含有量は、0.075mm以下で435mg/kgと初期よりも高い値を示し、0.075mm以上の砂分では含有量基準以下であった。鉛溶出量は、いずれの粒径においても環境基準以下であった。汚染土Bの鉛含有量は、0.075mm以下では180mg/kgと高い値を示したが、0.075mm以上の砂分では含有量基準以下であった。鉛溶出量は、0.075mm以下で環境基準を超えていたが、0.075mm以上の砂分では環境基準以下であった。したがって、0.075mm以上の砂の溶出量と含有量が基準値以下となることから、0.075mmを分級点とした分級洗浄が適用できると判断した。

### 4. 土中鉛の存在形態調査

#### 4.1 目的

効率の良い分級洗浄システムの検討に資することを目的とする。

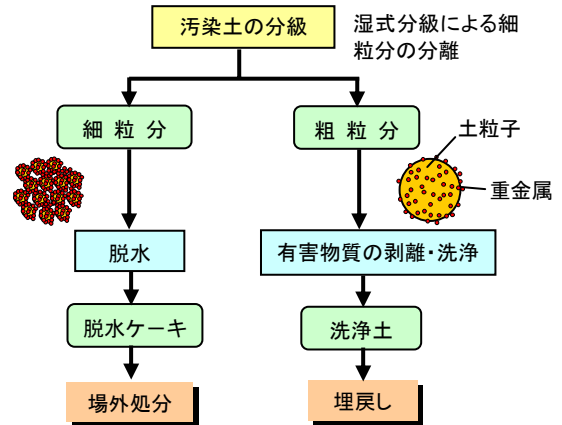


Fig. 1 分級洗浄処理の概要  
Scheme of Class Washing Remediation

Table 1 室内試験で用いた試料土の性状  
Physico-chemical Properties of Soil Samples

項目	単位	汚染土A	汚染土B
含水比	%	24.3	16.7
粒度分布	>2mm	13.5	6.2
	0.85~2mm	12.6	10.6
	0.25~0.85mm	25.3	36.1
	0.075~0.25mm	20.0	25.7
	<0.075mm	28.5	21.5
土のpH		7.8	8.4
鉛溶出量(環告46号)	mg/L	0.001	0.033
鉛含有量(環告19号)	mg/kg	210	54

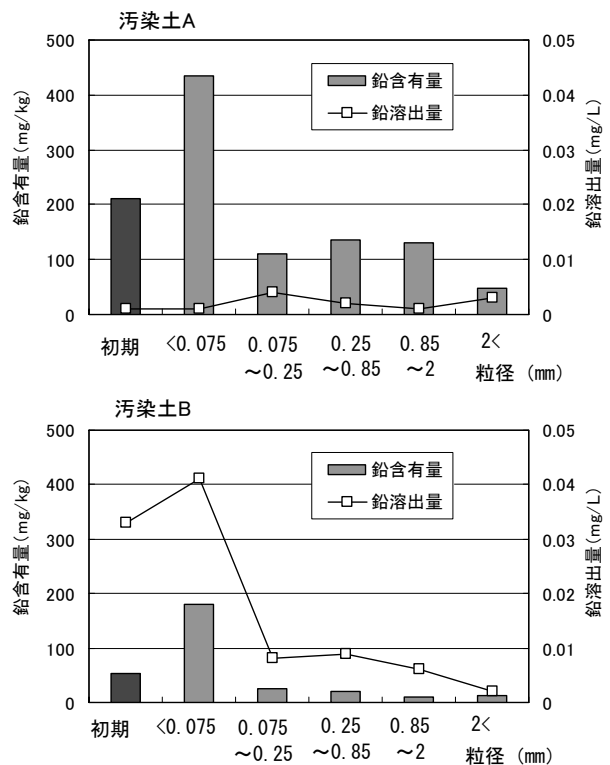


Fig. 2 粒径ごとの鉛含有量と溶出量  
Water-soluble Pb and Pb Content of Each Particle Size

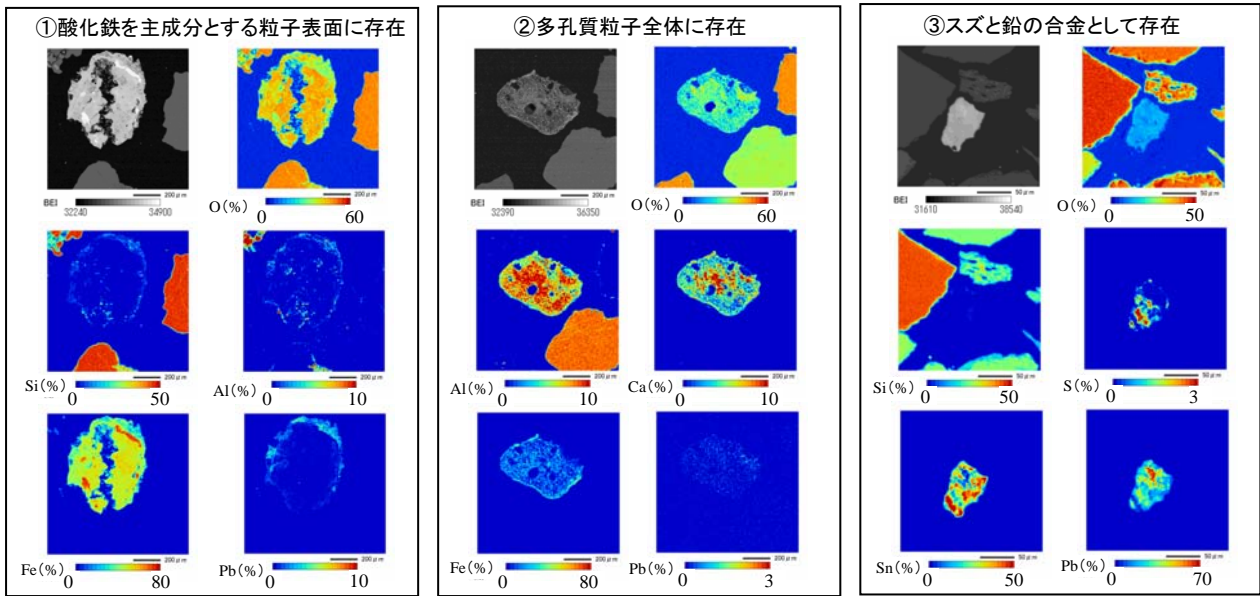


Fig. 3 鉛の存在形態に関するEPMAの解析結果  
Results of EPMA Concerning Existence Forms of Pb

的として、EPMA（X線マイクロアナライザー）解析と逐次抽出法を実施して、試料土中の鉛の存在形態を調べた。

#### 4.2 EPMA解析

EPMA解析とは、X線照射により土壌粒子表面の重金属または構成元素（酸素、ケイ素、アルミニウム、鉄等）の分布を調査する手法である。鉛と他の元素の分布や比率を調べることで、鉛の存在形態を推定した。

4.2.1 分析方法 現場から採取した鉛汚染土を用いた。①試料土を湿式分級して、粒径0.075～1mmの範囲から粒子を選定した。②選定した粒子を樹脂で固めて、土粒子の中心部分がむらなく露出するように研磨した。③薄片状の試料とした後、EPMAにより分析した。

4.2.2 分析結果 代表的な解析結果をFig. 3に示す。鉛の形態として、①酸化鉄を主成分とする粒子の表面に付着しているもの、②鉄、カルシウム、アルミニウムを含む多孔質粒子（風化が進んだ脆弱な粒子、泥岩や頁岩由来の粘土粒子等）全体に鉛が薄く存在しているものが多く観察された。その他にも③スズと鉛を主成分とする粒子としての存在が少量観察された。

#### 4.3 逐次抽出法

逐次抽出法とは、土壌構成物（鉄酸化物、有機物など）の酸など各種溶媒に対する溶解度の違いを利用して、特定の土壌構成物を分解・溶解し、構成物質中の重金属量を分析して、存在形態を推定する方法である<sup>4)</sup>。

4.3.1 試験方法 2種類の鉛汚染土（C：鉛溶出量0.002mg/L、含有量120mg/kg、D：鉛溶出量0.001mg/L、含有量151mg/kg）を用いた。逐次抽出法は定本らの方法<sup>5)</sup>に準じて行った。①水溶出態：試料土50gに水500mLを加え、6時間振とう後遠心分離にて抽出液を採取した。②交換態：残渣に0.05mol/L硝酸カルシウムを500mL加え、24時間振とう後遠心分離にて抽出液を採取した。③無機結合態：残渣に2.5%酢酸を500mL加え、24時間振とう後遠心分離にて抽出液を採取した。④有機物態：残渣に6%過酸化水素水を500mL加え、乾固直前まで加熱した後、2.5%酢酸を500mL加えて、24時間振とう後遠心分離にて抽出液を採取した。⑤酸化物態：残渣に0.2mol/L酸性シュウ酸アンモニウム1500mLとアスコルビン酸50gを加えて、沸騰湯浴上で2時間抽出後遠心分離にて抽出液を採取した。⑥残渣：残渣を底質調査法にて全量分析した。各抽出液中の鉛濃度を原子吸光により測定した。

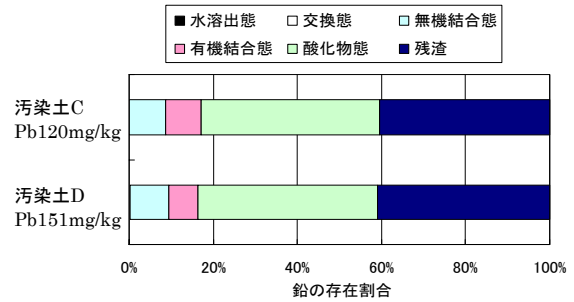


Fig. 4 逐次抽出法による鉛の存在形態  
Existence Forms of Pb investigated by Sequential Extraction

う後遠心分離にて抽出液を採取した。③無機結合態：残渣に2.5%酢酸を500mL加え、24時間振とう後遠心分離にて抽出液を採取した。④有機物態：残渣に6%過酸化水素水を500mL加え、乾固直前まで加熱した後、2.5%酢酸を500mL加えて、24時間振とう後遠心分離にて抽出液を採取した。⑤酸化物態：残渣に0.2mol/L酸性シュウ酸アンモニウム1500mLとアスコルビン酸50gを加えて、沸騰湯浴上で2時間抽出後遠心分離にて抽出液を採取した。⑥残渣：残渣を底質調査法にて全量分析した。各抽出液中の鉛濃度を原子吸光により測定した。

4.3.2 試験結果 Fig. 4に結果を示す。試料土中の鉛は、水溶出態や交換態は少なく、酸化物態と残渣が多い傾向にあった。このことから、土中の鉛の大部分は、鉄・アルミニウム酸化物の表面や土粒子内部、または難溶性の化合物として存在することが推定された。

#### 4.4 存在形態調査のまとめ

EPMA解析と逐次抽出法の結果はよく一致しており、これらの結果から、本汚染土中の鉛は、酸化鉄表面や多孔質な粘土粒子の内部に存在していることが推定された。したがって、分級洗浄処理において、土粒子表面の剥離や脆弱な粘土粒子の破壊が期待できる摩砕処理が品質向上に有

効と考え、システムに加えることとした。スズと鉛を主成分とする粒子を除去するには、比重選別等の工程が必要と考えられたが、その存在量は少なく、除去せずとも環境基準を達成できると考えて、本処理には採用しなかった。

### 5. 分級洗浄工事の浄化調査事例

室内試験の結果をもとに、現場の分級洗浄システムを構築し、浄化工事を実施した。ここでは、施工期間中に洗浄砂の品質と浄化効果の詳細を調査した事例を紹介する。

#### 5.1 工事概要

工事概要は以下の通りである。①分級洗浄の処理土量：12,150m<sup>3</sup>、②汚染面積：約4500m<sup>2</sup>、③汚染深度：平均でGL-3m、④工期：約10ヶ月。なお、調査期間は約2日間で、その間に分級洗浄処理した土量は約200m<sup>3</sup>であった。

#### 5.2 分級洗浄処理フロー

現場で使用した分級洗浄システムをFig. 5に示す。また、洗浄プラントの写真をPhoto 1に示す。調査時の運転条件をTable 2に示す。施工手順は以下の通りである。①掘削した汚染土をバックホウにて洗浄プラントへ投入し、篩により粒径100mm以上のレキを除去した。②汚染土を少量の水とともにドラムウォッシャーに入れ、大きな粘土塊を壊した後、篩により粒径40mm以下の土砂と40mm以上のレキに分級した。③40mm以下の土は高度摩砕システムに投入し、粒子表面に付着した重金属を分離した。④40mm以下の土砂と40～100mmのレキを震動篩いに投入し、5～100mmの洗浄レキと5mm以下の泥水に分けた。⑤5mm以下の泥水はハイメッシュセパレーターへ投入し、0.075～5mmの砂と0.075mm以下の泥水に分けた。⑥0.075～5mmの砂は、高効率すすぎシステムにより、混入した細粒分を除去して洗浄砂とした。⑦0.075mm以下の泥水は、凝集沈殿とフィルタープレスにより脱水ケーキとした後、搬出処分した。分離水は、鉛を除去した後に、洗浄用の水として再利用した。⑧洗浄砂は、環告46号の溶出量と環告19号の含有量試験を行い、環境基準値を達成したことを確認した後、埋戻し土として利用した。

#### 5.3 分級洗浄後の洗浄砂の品質

調査期間中に採取した未処理土と洗浄砂（0.075～5mm）の性状をTable 3に示す。未処理土は、汚染地盤から鉛汚染土を掘削・運搬した後、プラント投入前にバックホウで混合した土を採取して分析した。土量が多かったため完全な均一化はできず、初期の性状にばらつきがあった。pHは6.8～10.2と中性からアルカリ性で、アルカリ性の高い土にはコンクリートガラが認められた。鉛溶出量は0.001～0.017mg/L、鉛含有量は41～151mg/kgで、比較的低汚染土であった。

洗浄砂のpHは7.4～10.7で、未処理土と同じ弱アルカリ性を示した。粒度は、未処理土と比べて0.075mm以上の砂

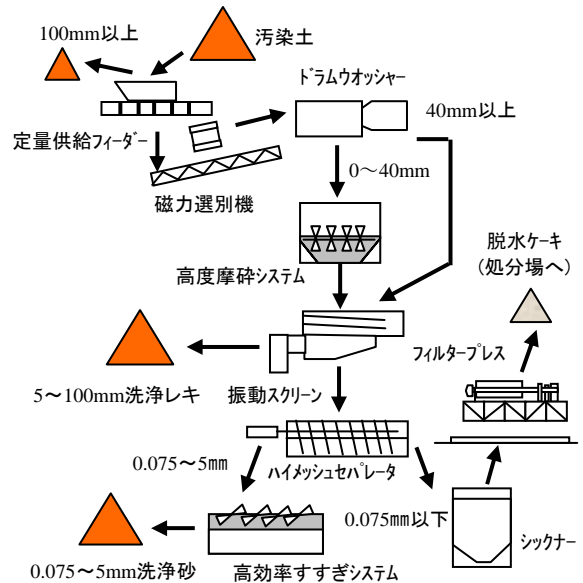


Fig. 5 分級洗浄システム  
Class Washing System

Table 2 プラントの運転条件  
Operation Conditions of Plant

装置	項目	運転管理条件
定量供給フィーダー	投入土量	20～30m <sup>3</sup> /h
	回転数	18rpm±20%
ドラムウォッシャー	水量	土に対して30～50%
	回転数	A : 16rpm, B : 160rpm±20%
高度摩砕システム	水量	出口での水切れが良いこと
振動スクリーン	水量	泥水濃度50～60g/L程度
ハイメッシュセパレーター	水量	



Photo 1 分級洗浄プラント  
Class Washing System

が増加し、0.075mm以下の細粒分が減少した。環告46号の鉛溶出量は0.001～0.007mg/L、環告19号の鉛含有量は22～110mg/kgで、未処理土と比べて減少し、すべての洗浄砂において基準値を達成できた。洗浄土の品質には少しばらつきがあったが、これは投入した未処理土のばらつきが反映したものと考えられる。



Table 3 未処理土と洗浄砂の性状  
Physico-chemical Properties of Contaminated Soils and Washed Soils

項目	単位	未処理土	洗浄砂
自然含水比	%	6.4~13.8 (n=8)	17.0~32.1 (n=8)
粒度分布	>2mm	5.9~11.1 (n=9)	6.2~17.1 (n=9)
	0.85~2mm	11.1~16.7 (n=9)	12.1~19.5 (n=9)
	0.075~0.85mm	51.9~68.2 (n=9)	63.1~80.6 (n=9)
	<0.075mm	10.4~24.3 (n=9)	0.3~1.0 (n=9)
土のpH	—	6.8~10.2 (n=7)	7.4~10.7 (n=6)
EC (電気伝導度)	mS/m	3.4~16.6 (n=7)	4.1~26.5 (n=6)
鉛溶出量 (環告46号)	mg/L	0.001~0.017 (n=10)	0.001~0.007 (n=13)
鉛含有量 (環告19号)	mg/kg	33~151 (n=10)	22~110 (n=13)

Fig. 6に未処理土と洗浄砂 (それぞれn=3) の粒度分布を示す。洗浄土の0.075mm以下の細粒分は、測定を行った3試料土とも、1%以下の値を示した。したがって、本分級システムにより、0.075mm以下の細粒分が精度よく除去できたことを確認した。

## 6. 品質管理のための簡易分析手法

### 6.1 濁度計を用いた洗浄砂の細粒分残存率の分析

6.1.1 目的 洗浄砂中の細粒分 (0.075mm以下) の残存率は、洗浄砂の品質に大きく関わっているため、現場施工においては重要な管理項目になる。したがって、本現場から採取した未処理土や洗浄砂を用いて、濁度を利用した簡易で迅速な測定手法の検討を行った。

6.1.2 分析方法 洗浄砂を一定量の水へ投入し、よく攪拌した後、水の濁りを濁度計で測定することで、細粒分の残存率を調べる方法を検討した。詳細な手順は以下の通り。  
①洗浄砂100gに水500mLと0.3Mのトリポリリン酸ソーダ (分散剤) を10mL加えて、1分間激しく振とうした。  
②1分間静置して、上澄み液の上面から3cmの箇所からピペットで試料を採取した。  
③試料を濁度計にて測定した。

6.1.3 結果と考察 Fig. 7に細粒分の残存率と濁度の関係を示す。細粒分の残存率は、1%以下では、明確な相関が認められなかったが、1%以上では濁度とともに増加する傾向がみられ、両者には比例の関係があった。したがって、細粒分残存率が1%以上であれば、濁度により細粒分残存率を分析することが可能であると考えられた。

Fig. 8に、本現場から採取した比較的汚染レベルの高い2種類の汚染土 (EとF土) を用いて、細粒分と砂分の鉛含有量 (環告19号) と細粒分の残存率から、全体の鉛含有量を算出したものを示す。両汚染土とも、鉛含有量は、細粒分が減少するとともに小さくなり、E土では細粒分の残存率が10%以下、F土では5%以下で含有量基準 (150mg/kg) を達成した。細粒分の鉛含有量が高いこれらの汚染土においても、細粒分を5%以下に減らすことで浄化が可能であるため、1%以上の精度で細粒分の残存率を測定できる本

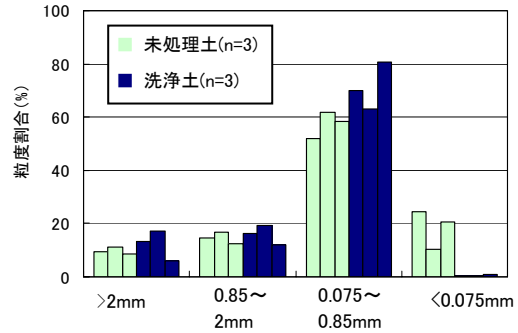


Fig. 6 未処理土と洗浄砂の粒度分布  
Grain Size Distribution of Contaminated Soils and Washed Soils

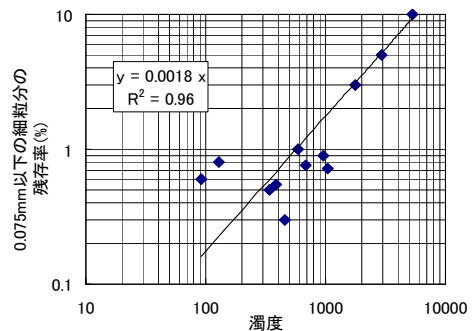


Fig. 7 細粒分の残存率と濁度の関係  
Relation between Residual Ratio of Fine Grain and Turbidity

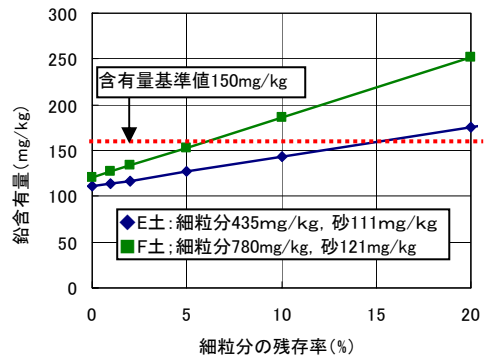


Fig. 8 細粒分の残存率と鉛含有量の関係  
Relation between Residual Ratio of Fine Grain and Pb Content

手法は、簡易な品質確認手法として有効と考えられた。

### 6.2 蛍光X線を用いた鉛含有量・溶出量の簡易分析

6.2.1 目的 鉛含有量 (環告19号) と溶出量 (環告46号) の分析には、通常4~5日を要する。その間は洗浄砂の置きが必要となるため、十分なヤードを確保できない現場では、施工に支障をきたす場合がある。そのため、本現場から採取した鉛汚染土を対象に、迅速かつ簡易に測定できる手法として、蛍光X線を用いた含有量測定法<sup>5)</sup>の精度を調べた。また、含有量分析の精度向上と溶出量の分析を可能とするため、吸着材と蛍光X線を組み合わせた新しい簡易分析手法についても検討を行った。

6.2.2 分析方法 蛍光X線による鉛含有量測定の方法は以下の通りである。  
①試料土30gを電子レンジにて3分間乾燥した後、ミルで粉碎して粉末状とした。  
②粉碎土をホル

ダーに入れ、蛍光X線装置 (OURSTEX160) で測定した。

吸着材と蛍光X線を併用した測定手法は以下の通り。①含有量は環告19号の方法で、溶出量は環告46号の方法で抽出・溶出操作を行なった。②含有量抽出液は20倍希釈した後、濾紙型吸着材に通過させ、鉛を吸着させた。溶出液の場合は、原液のまま濾紙型吸着材に通過させ、鉛を吸着させた。③吸着材を乾燥させた後、蛍光X線で分析した。

**6.2.3 結果と考察** Fig. 9に蛍光X線の分析値と19号鉛含有量の関係を示す。X線分析値と鉛含有量の間には、比較的良好な正の相関が認められた。したがって、鉛含有量の簡易分析手法として、蛍光X線は適用できると考えられた。しかし、50mg/kg以下の範囲では、蛍光X線の測定値の方が、19号含有量よりも高めの値であった。

Fig. 10とFig. 11に、吸着材と蛍光X線による簡易分析の結果と、鉛含有量 (環告46号) と溶出量 (環告19号) の関係を示す。本法の分析値と鉛含有量の間には、低濃度範囲においても良好な相関が認められ、精度の高い分析ができた。溶出量については、少しばらつきがあり、特に0.01 mg/L以下の範囲では信頼性が低い結果であったが、全体的には正の相関が認められた。以上の結果から、鉛含有量の簡易分析には蛍光X線が適用でき、より精度が求められる場合および鉛溶出量の分析には、吸着材と蛍光X線の組合せが妥当と考えられた。

## 7. まとめ

- 1) 室内トリータビリティ試験の結果から、本サイトの鉛汚染土は0.075mmを分級点にして湿式分級を行うことで、鉛含有量の大きい細粒分と環境基準値以下の砂に分けられることができた。
- 2) EPMA解析と逐次抽出の結果から、土中の鉛は酸化粒子の表面に多く存在しており、洗浄における摩擦の有効性が示された。
- 3) 現場の分級洗浄システムにおける洗浄砂の品質を調査した結果、洗浄砂の細粒分残存率は1%以下となり、鉛含有量と溶出量ともに基準値以下を達成できた。
- 4) 濁度計を用いた洗浄砂中の細粒分残存率の簡易分析法は、残存率が1%以上の範囲であれば精度良く測定でき、品質管理に有効と考えられた。
- 5) 蛍光X線を用いた鉛含有量の簡易分析法は、精度が高いことを確認できた。また、吸着材と蛍光X線を用いた手法により、より高い精度で鉛含有量と溶出量ともに分析することができた。

## 参考文献

- 1) 八木信太郎, 他: 重金属汚染土の分級処理工事例, 土壤環境センター技術ニュース, No.7, pp.32~35, (2003)
- 2) 毛利光男, 他: 土壤洗浄プラントによる汚染土壌の浄化事例, 第10回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究会講演集, pp.267~270, (2004)

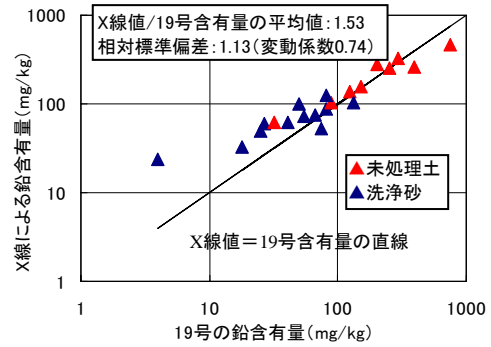


Fig. 9 蛍光X線分析値と鉛含有量の関係  
Relation between X-ray Analysis Values and Pb Content

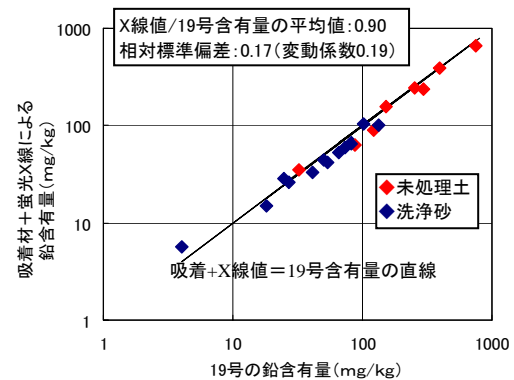


Fig. 10 吸着材+蛍光X線分析値と鉛含有量の関係  
Relation between Adsorption Material + X-ray Analysis Values and Pb Content

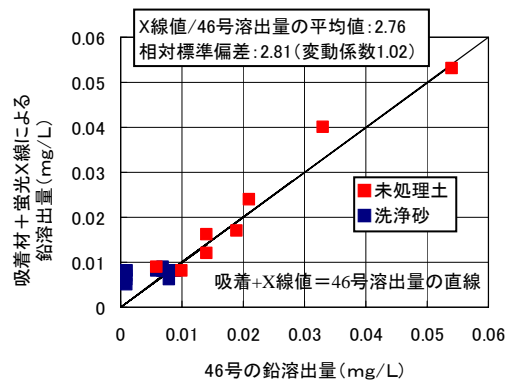


Fig. 11 吸着材+蛍光X線分析値と鉛溶出量の関係  
Relation between Adsorption Material + X-ray Analysis Values and Water-Soluble Pb

- 3) 二見達也, 他: 重金属汚染土高効率浄化方法, 第10回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究会講演集, pp.213~216, (2004)
- 4) 丸茂克美: 土壤と底質の分析, ぶんせき, No.10, pp.565~271, (2005)
- 5) 菊地達也, 他: 重金属汚染土壌の現場分析, 第9回地下水・土壤汚染とその防止対策に関する研究会講演集, pp.312~313, (2002)
- 6) 定本裕明, 他: 土壤中重金属の形態分別法の検討, 日本土壤肥料化学雑誌, 第65巻, 第6号, pp.645~653, (1994)