分級, 比重選別, 表面研磨等による 重金属汚染土壌浄化実用技術の一例

二 見 達 也*

Practical Approach to Remediating Heavy Metal-contaminated Soil by Grain Sorting, Gravity Separation, and Grain-surface Attrition

Tatsuya FUTAMI*

Abstract

The states of contaminated soil vary widely; therefore, the techniques applicable to the soil concerned and appropriate equipment should be selected and used with care. The authors developed a contamination diagnosis method involving an investigation into types of contamination and contaminated states of different grain-size fractions, as well as a highly efficient method of remediating heavy metal-contaminated soil using grain sorting, gravity separation, and grain-surface attrition according to the properties of the soil. We conducted soil remediation using contamination diagnosis and highly efficient remediation methods for both on-site and fixed-site (off-site) cleaning cases, and achieved cleaning efficiencies exceeding 80% in both cases (more than 80% of contaminated soil was cleaned). The cleaned soil obtained in the on-site case was reused as backfill at the site. The cleaned soil in the fixed-site case (off-site case) was effectively recycled as a raw material for fine aggregate.

Key words : excavation disposal, heavy-metal contaminated soil, grain sorting, grain-surface attrition, gravity separation, JIG separation device, centrifugal JIG separation device, on-site cleaning, fixed-site cleaning

キーワード : 掘削処分, 重金属汚染土壌, 分級, 表面研磨, 比重選別, ジグ選別機, 遠心ジグ, オンサイト洗浄, 定置型洗浄

I. はじめに

これまでの土壌修復は汚染土壌を清浄土壌と入れ替え, 掘削された汚染土壌は, 焼却, セメント原料化, 管理型処分場埋め立てによって処理・処分されてきた。しかし汚染土壌の入れ替えには, 汚染土壌の輸送とそれに代わる清浄土壌の確保と輸送が必要で, そのエネルギーは膨大である。さらに輸送中の汚染物質の飛散を防止する安全管理

とともに, 今後処分容量不足の問題が生じる可能性もある。よって搬出処分コスト軽減と処分する汚染土壌を減らすことは急務の課題である。

最近では掘削処分に代わる方法として, 新しい浄化手法が脚光を浴び, 様々な浄化技術が提案され適用されるようになってきた。しかしこれらには, 海外からの導入技術が多く, 国内の土壌仕様に適していないもの, また浄化技術の理論そのものに疑問を持たれている方法もある。実験室レベ

* スミコンセルテック (株)

* SUMICON CERTECH Co., Ltd.

ルでは浄化可能でも、何万トンという土壌を対象とした実用手法としては成立しないものや、鉱山技術起源の方法を採用しているが、適用すべき土壌粒度を間違えているようなケースも見受けられる。よって対処すべき土壌ごとに適用可能な技術かどうか、また適切な浄化装置の選定と使用が行われているかどうかの見極めが必要である。

汚染土壌は様々な汚染形態をとっていることから、浄化対策工事の経済性向上のためには、事前調査が非常に重要である。一般的な土壌サンプリングと分析だけでは判断できない汚染形態調査や粒度ごとの汚染状況の解明など、いわゆる汚染特性の解明が必要である。その汚染特性に対して浄化技術の適用可否の判断は重要であり、様々な浄化技術を適正に取捨選択すべきである。

ここでは、筆者らが関わった事例として重金属による汚染土壌の浄化における汚染形態の解明と、それをもとにした浄化実用技術の実例を紹介し、それらの経済性について議論する。

II. 汚染土壌の分級 (grain sorting) 洗浄における問題点とその解決法

重金属汚染土壌の浄化については、洗浄により浄化する方法がいくつか事業化されている。しかしこれまでは、ただ単に土壌を汚染濃度が高い土壌粒子（細粒部に多い）と低い土壌粒子に分級する方法が採用されており、おおむね 75 μm 以下を汚染土壌として処分されてきた（川上ほか、2007）。しかしながらこの方法は、汚染土壌を常に高い割合で浄化できるわけではない。また、国内の土壌は比較的細粒部が多いことから、洗浄後処分しなければならない汚染土壌の割合が高く、回収できる清浄土壌が少なくなるので効率が悪い。

今回紹介する重金属汚染土壌高効率浄化法は、重金属汚染土壌に対し、その汚染特性に合致した新規技術を用いることで、より高効率な浄化を達成し、掘削処分に比べ経済的な土壌修復を実現するものである。

1) 重金属汚染土壌の特性

土壌構成成分は、多いものから酸素、珪素、ア

ルミニウム、鉄、カルシウムであり、これら 5 成分で 90% 以上を占める（瀧本、1969）。自然由来の場合を除き、特定有害物質として指定された重金属は、元々は有用物として社会に供給されたものが何らかの理由で土壌に混入し、重金属汚染土壌となる。

実際の汚染土壌は、汚染現場の土質や汚染原因によって、粒度分布、汚染物質の存在部位、汚染物質の形態が複雑に絡んで形成されている。粒度によって汚染濃度が異なることはもちろん、汚染形態も様々なものが存在する。したがって、対象となる汚染土壌を最大限に浄化するためには、その汚染特性を明らかにする必要がある。このために、粒度別汚染濃度の把握、各粒度の土壌粒子断面を対象とする EPMA (Electron Probe Micro Analyzer) 解析、の主に二つの調査結果をもとに汚染土壌の汚染特性の把握を行う。EPMA 解析とは土壌粒子の断面に電子線を照射し、放出される元素固有の特定 X 線を測定することにより、構成物質の情報を得るものである。この汚染特性の把握が土壌浄化を行ううえで非常に重要である。

1-1) 土壌粒子の粒径による汚染特性の把握

表 1、表 2 に示すような粒度別分級によれば、汚染が集中している粒子径を把握できる（二見、2006）。

表 1 の事例では 2 mm 以上は指定基準以下（鉛含有値：150 mg/kg 以下、鉛溶出量：0.01 mg/l 以下）であることから、2 mm で分級するだけで、2 mm 以上の粒径の土壌を清浄土壌として得ることができる。この汚染現場は細粒分が少ない土壌によって盛土造成されており、鉛が付着した衣類やパレット等の焼却設備跡地である。一方、鉛を取り扱う金属線材を加工する工場跡地であった表 2 の事例では、どの粒径もすべて高度に汚染されているため、分級の手法では浄化できない土壌である。

1-2) EPMA 解析による汚染特性の把握

EPMA 解析によって、汚染物質の土壌中の存在部位と汚染構成物質と濃度 (%) が把握できる。EPMA 解析の結果、汚染形態は汚染物質の使用

表 1 粒度別汚染状況その 1.

Table 1 Contaminated states of different grain-size fraction-1.

粒径 (mm)	粒度分布 (重量%)	鉛含有量 (mg/kg)	鉛溶出量 (mg/l)
+10	53.5	29	<0.005
4.75 ~ 10	12.8	54	0.008
2 ~ 4.75	8.6	65	0.008
1 ~ 2	4.7	240	0.075
0.425 ~ 1	6.5	380	0.140
0.212 ~ 0.425	3.2	300	0.098
0.075 ~ 0.212	2.6	630	0.057
-0.075	8.1	1,800	0.007

表 2 粒度別汚染状況その 2.

Table 2 Contaminated states of different grain-size fraction-2.

粒径 (mm)	粒度分布 (重量%)	鉛含有量 (mg/kg)	鉛溶出量 (mg/l)
+4.75	38.0	24,000	0.100
2 ~ 4.75	11.3	25,000	0.120
1 ~ 2	7.8	23,000	0.120
0.425 ~ 1	10.0	23,000	0.140
0.212 ~ 0.425	9.3	22,000	0.160
0.075 ~ 0.212	9.5	23,000	0.110
-0.075	14.1	23,000	0.081

図 1 汚染形態.

(a) 汚染物質が単体で存在, (b) 汚染物質が付着, (c) 汚染物質が表面を汚染, (d) 汚染物質が浸透, (e) 汚染物質が細孔に混入.

Fig. 1 Type of contamination.

(a) Type of solid, (b) Type of adsorption, (c) Type of surface adsorption, (d) Type of osmosis, (e) Type of contamination in the soil pit.

方法によって様々であることがわかっており、大きく分けて以下の 5 種類に分別できる。

図 1 にこれらの概念図を示す（二見ほか、2007）。

- 汚染物質の塊が土壤中に存在
- 土壌粒子の表面の一部に汚染物質が付着
- 土壌粒子の全表面に薄い膜状に汚染物質が付着
- シルトなどに汚染物質が浸透したもの
- 土粒子の細孔部に汚染物質が存在

また a のような塊であっても、例えば鉛の場合、ハンダのような金属で存在する場合（図 2）と、錆止め塗料中に含まれる鉛のように、カルシ

ウムなどと合体した形で存在する場合（図 3）とがある（二見、2006）。汚染物質が塊状で存在する場合、比重選別が汚染物質除去に効果的であるが、ハンダの場合は土壌粒子よりも重く、塗料の場合では土壌粒子より軽くなるので、汚染原因物質の特性を考慮しなければならない。b や c の場合（図 4）はアトリッション（表面研磨）によって土壌粒子から汚染物質を削り落とし、細粒分として分級する方法が効果的である（二見、2006）。

d の場合は b や c の場合と同様にアトリッション操作を行うとバラバラに細粒化する場合が多く、細粒分として分級する方法が効果的である。e の場合はそれほどの実例がないものの、土壌粒

図 2 EPMA 像 (鉛塊の Pb 濃度検出例).

各写真は表示物質の存在部位を示す.

A: この粒子は若干、酸素とスズが存在しているのみで他の物質の存在がなく、鉛の塊であることがわかる.

Fig. 2 EPMA analysis (Type of lead solid).

Each figure shows the location of each material component.

A: This figure shows that the soil contains lead and small amounts of oxygen and tin.

図 3 EPMA 像 (塗料系汚染の Pb 濃度検出例).

各写真は表示物質の存在部位を示す.

A: この粒子は同じ粒子に Ca と Cr も写っており、鉛と Ca と Cr の合体した粒子であることがわかる.

Fig. 3 EPMA analysis (Type of paint containing lead).

Each figure shows the location of each material component.

A: This figure shows that the soil contains lead as well as calcium and chromium.

図 4 EPMA 像（粒子表面での濃度検出例）。
各写真は表示物質の存在部位を示す。

Fig. 4 EPMA analysis (Type of grain-surface contamination).
Each figure shows the location of each material component.

図 5 EPMA 像（硫砒鉄鉱の濃度検出例）。
各写真は表示物質の存在部位を示す。

Fig. 5 EPMA analysis (Type of arsenopyrite).
Each figure shows the location of each material component.

子内部に汚染物質が存在しているため、わずかな比重差によって分離するしか浄化手段はない。

次に自然由来の場合の例を図 5 に示す。

これはヒ素、鉄、イオウによって構成された粒子であり、自然界に存在する硫砒鉄鉱（FeAsS）であることがわかる。このように EPMA 解析に

よって、汚染原因が人工的か自然由来かを解明することができる。

ここでは鉛とヒ素を例として示しているが、土壤汚染対策法にて指定されている重金属 6 種（鉛、ヒ素、カドミウム、六価クロム、セレン、水銀）についても同様の解析を行うことができる。

2) 単位浄化手法

分級には、振動ふるいとサイクロンが一般的に使用されている。サイクロンは遠心力を利用して、粒径による分離だけではなく、比重の違いによる分離も行われる。土壌の主要構成物質である SiO_2 の比重は 2.7, FeO の比重は 5.2 であるから、分離粒径は 1.6 倍ほど異なる。このことを認識したうえで両手法を使い分ける必要がある。

重金属汚染の場合、先述したように汚染物質が土壌より重い場合と軽い場合とがあるので、比重選別が土壌と汚染物質の分離に有効である。比重選別装置として、鉱山の選鉱で使用している滑り台のようなスパイラル式装置では、土壌粒子の粒度幅が大きいときはあまり効果的でなく、ジグ選別機が効果的である。しかし、従来のジグ選別機は、粒径 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以上の粒子を対象とした比重選別法であった（伊藤ほか, 2005）。汚染物質を土壌から効率よく分離するためには、 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下の土壌粒子を比重選別できる技術が必要であり、このためには遠心ジグを導入した（図 6）（二見, 2006）。

鉱業分野で選鉱に用いられ始めた新分離方式である遠心ジグの比重選別法は、通常ジグ選別機の弱点である粒径 $100\text{ }\mu\text{m}$ 以下の領域における比重選別を可能とし、遠心力によって粒径 $30\text{ }\mu\text{m}$ までの比重選別が可能である。遠心ジグには、土壌を含んだ水を供給する（図 6 において **FEED** と表示）。内部の回転ドラム中に遠心力と脈動を与えると、重比重分と軽比重分の間の比重を持ち、重比重分と軽比重分を分離するための分離膜の働きをするラギング材（図 6 において **RAGGING** と表示）を重比重分のみが通過し、軽比重分は通過できずオーバーフローして排出される（図 6 において **TAILING** と表示）。

土壌粒子の表面に汚染物質が付着している場合、表面研磨を行って表面の汚染物質を削り落とし、細粒分として分級すれば浄化された土壌を回収することができる。ただし、表面研磨のための設備の選択には注意を要する。土壌粒子そのものを碎いてしまい、細粒分を増やすだけの場合があ

図 6 遠心ジグ比重選別機の構造。

Fig. 6 Structure of centrifugal JIG separation device.

るからである。表面研磨装置としては、逆流式混合機であるアトリションミキサーが効果的である。汚染土壌の浄化に使用する場合は、その汚染特性に合わせ、装置内滞留時間や水分比率などの操作方法を決定する必要がある。

3) 洗浄プロセス

これまで述べた汚染土壌の特性調査の結果を踏まえ、単位浄化手法である分級、比重選別、表面研磨を適切に組み合わせることにより、汚染特性に適合した洗浄プロセスを構築することができる。

実用化した洗浄プロセスの一例を図 7 に示す（二見, 2006）。

このプロセスは汚染物質である重金属と土壌粒子を解離し、適切に分離するため、主に表面研磨による解離と、比重選別による分離を採用した。特に数十 μm 径の汚染粒子分離に焦点をあて高効率浄化を目指している。

最初に格子状のふるいを通して、格子の大きさ以上の粒径を分離するグリズリーで 50 mm 以上の大粒径土壌を分離し、その後ドラムウォッシャーにて洗浄水を加え、土壌を解砕し、振動ふるいにて粒径 2 mm 以上のものを分離する。粒径 2 mm 以上の土壌粒子は、通常汚染度が低く、指定基準を下回ることが多い。ただし、汚染状況

図 7 洗浄プロセス.

Fig. 7 Cleaning process.

によっては分級する土壤粒子径の変更や比重選別による汚染物質の除去が必要となる。次にスパイラル分級機によって $30\ \mu\text{m}$ 径以下の土壤粒子を分離し廃棄土壤とする。 $2\ \text{mm}$ から $30\ \mu\text{m}$ 径の土壤粒子はアトリッションミキサーによって表面研磨を行って汚染物質を解離した後、サイクロンによる分級とジグ選別機による比重分離によって清浄土壤を分離する。削り落とされたり、比重分離で分離された汚染物質は廃棄土壤とともにシクナーにて凝集沈殿を行い、フィルタープレスで水分を除去し汚泥として処分する。

4) 重金属汚染土壤洗浄の実例

実用化された洗浄技術には洗浄設備を汚染サイトに持ち込み、現地にて洗浄浄化を行うオンサイト洗浄と、定置式洗浄工場として洗浄設備を設置し、汚染サイトから汚染土壤を運搬して洗浄浄化を行う定置型洗浄とがある。ここでは、これら二種類の実用化例について示す。

4-1) オンサイト洗浄

遠心ジグによる比重選別技術、および最小 $30\ \mu\text{m}$ 径による分離技術などの有効な技術を組み合わせ、実用的なシステムを構築した。このシステムを基本として、汚染特性に適合した洗浄プロセスによるオンサイト洗浄の実施例には以下のものがある。

a. 鉛加工工場敷地（土壤量：2,000 トン、最

大鉛含有値：2,000 mg/kg、最大鉛溶出値：0.019 mg/l）にて土壤の汚染形態を調べると、 $30\ \mu\text{m}$ 径以下の土壤が 10% 程度で、鉛による表面汚染であることが判明した。そこで、図 7 に示した洗浄プロセスを用いてオンサイト洗浄したところ、85% の清浄土壤（鉛含有量：150 mg/kg 以下、鉛溶出値 0.01 mg/l 以下）を得ることができた。この際洗浄に用いる洗浄水の使用量が多いと水処理設備の負荷が大きくなり経済性が悪くなる。ここでは洗浄水を土壤量の約 3 倍に抑えるとともに、凝集沈殿法を用いて洗浄排水中に含まれた鉛を取り除き、リサイクルを行うことで排水量を減らし洗浄コストを低減した。

b. 機械工場敷地（最大鉛含有値：1,400 mg/kg、最大鉛溶出値：0.32 mg/l）にて汚染土壤浄化を実施した。鉛含有値が 1,000 mg/kg を超える高濃度汚染土壤があるものの、指定基準をわずかに上回る 200 mg/kg 程度の低濃度汚染土壤も大量にあるため、洗浄プラントを 2 セット設置した。低濃度汚染土壤は砂質土壤であるため $75\ \mu\text{m}$ で分級する洗浄プロセスを適用し、高濃度汚染土壤に対しては表面研磨を中心とした高性能洗浄プロセスを適用した。その結果、約 7

万トンを約4ヶ月で洗浄処理し、約80%の土壌を清浄化し（鉛含有値：150 mg/kg以下、鉛溶出値 0.01 mg/l 以下）埋め戻した。本サイトは土壌汚染対策法に該当していたため、浄化工事終了後、県による浄化確認が行われ指定区域が解除された。

4-2) 定置型洗浄

オンサイト洗浄は、浄化した清浄土壌を現地に埋め戻し、搬出土壌量を削減するという利点があるものの、洗浄プラントを現地に設置するための敷地が必要であることから、大規模汚染サイトにしか適用できない。このため、小規模汚染サイトでは、汚染サイトの特性に適合した洗浄装置を組み合わせた定置型洗浄のほうが経済的である。

ここでは定置型土壌洗浄プラント（図8）の一例を紹介する（スミコンセルテック, 2007）。プラント操業開始から、約2万トン（最大ヒ素溶出

図8 定置型土壌洗浄プラント。
処理能力：300トン/日、敷地面積：1,200 m²。

Fig.8 Fixed-site cleaning plant.
Cleaning capacity: 300 t/day, Plant area: 1,200 m².

値：0.06 mg/l、最大フッ素溶出値：3.4 mg/l）の汚染土壌を処理した時点の清浄土壌の回収率（汚染土壌から回収できた清浄土壌の割合。浄化効率を示す。）を表3にまとめた（二見ほか, 2007）。

4サイトの汚染土壌からの清浄土壌の回収率は78.3%～85.2%であり、清浄土壌（ヒ素溶出値：0.01 mg/l 以下、フッ素溶出値：0.8 mg/l 以下）の平均回収率は80.6%となった。この清浄土壌の内約60%の砂分は、細骨材の原料として有効利用できた。

III. ま と め

今回紹介した重金属汚染土壌高効率浄化法の特徴と効果を以下に列挙する。

- ・EPMAによる土壌粒子断面解析によって、汚染物質の存在部位、存在形態を把握し、洗浄プロセスの設計に利用できる。
- ・EPMAによる土壌粒子断面解析によって、自然由来か人工汚染かの判別ができる。
- ・従来型選鉱技術（サイクロンや粒径100 μm以上の粒子を対象としたジグ選別機など）と新浄化技術を組み合わせ、土壌粒径が最小30 μmを対象とした高効率な処理システムを構築できる。

土壌汚染は他の公害とは異なる特徴を持っており、まずその汚染原因が長期間にわたっている場合が多いこと、またその被害を体感しにくい公害であるということである。しかしながら土壌汚染は、長期蓄積型の環境汚染であり、地下水汚染に至ると膨大なエリアが汚染される可能性がある。よって環境保全の観点から土壌汚染は大きな環境課題であると言える。

このような状況の中、汚染土壌浄化の実用技術

表3 処理実績。

Table 3 Results of fixed-site cleaning cases.

サイト名	A	B	C	D	計
受入土壌量 (t)	2,572	4,563	515	12,350	20,000
清浄土回収量 (t)	2,014	3,750	439	9,917	16,120
清浄土回収率 (%)	78.3	82.2	85.2	80.3	80.6

として開発した重金属汚染土壌高効率浄化法によって、経済的な修復と掘削処分土壌量の削減を実現できた。社会ニーズに技術によって応えた実例は、新たな技術開発を促す原動力になると思われる。今後益々複雑になる土壌環境問題に対し、真に浄化できる修復技術の開発とそれを正当に評価する社会システムの発展が望まれる。

謝 辞

本研究を進める上で平田健正博士（和歌山大学システム工学部環境システム学科教授）、恒川昌美博士（北海道大学大学院工学研究科教授）には貴重な指摘をいただきました。ここに謝辞を表します。

文 献

- 二見達也（2006）: 土壌洗浄法における細粒分等の分離浄化技術. 環境資源工学会シンポジウム「リサイクル設計と分離精製技術」資料集, 30.
- 二見達也・本間智英・金 雅克・高橋 真（2007）: 定置型土壌洗浄プラントによる土壌洗浄の実例. 第13回「地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会」講演集, 27.
- 伊藤正登・北山茂一・恒川昌美（2005）: ジグ選別によるASRの分離精製への展開. 環境資源工学会シンポジウム「リサイクル設計と分離精製技術」資料集, 21.
- 川上 智・奈良部善之・渡邊亮栄（2007）: 土壌洗浄法における分散・分級操作の改善と汚染の低減. 第13回「地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会」講演集, 567.
- スミコンセルテック（2007）: 定置型汚染土壌洗浄プラントパンフレット.
- 瀧本 清（1969）: 新版鉱床学ラティス版. 丸善.

（2007年7月30日受付, 2007年11月19日受理）