

オンサイト土壌浄化システム「Mr. ラクーン」の開発 Development of On-site Soil Purification System “Multi Role. Raccoon”

山崎 将義*	金子 守利*
Masayoshi Yamazaki	Moritoshi Kaneko
桑原 康*	大西 徳治*
Yasushi Kuwahara	Noriharu Ohnishi

要 約

平成 15 年 2 月に土壌汚染対策法が施行され、土壌汚染に対する社会的認識はますます高まっております。土壌汚染対策市場は拡大傾向にある。当社では重金属および鉱物油類で汚染された土壌を可搬式プラントによって現場内で短期間に浄化するオンサイト土壌浄化システム「Mr. ラクーン」を開発し、昨年より本格的に土壌汚染対策事業に参入した。本システムは、掘削した汚染土壌を洗浄プラントに投入し、解砕、洗浄、分級したのち、浄化した砂・礫分を埋め戻し土として再利用、汚染物質を濃縮したシルト・粘土分をセメント原料または産業廃棄物として処理・処分するものである。本システムの性能評価のため、実証実験を行った。その結果、今回、実験に供した実汚染土壌では、鉛と砒素の土壌含有量基準の 3 倍程度を上限として浄化可能であることを確認した。また鉱物油類については土壌含有量約 4,000mg/kg の汚染を浄化でき、現状の浄化対策ニーズに十分応える性能を有することが立証された。さらに、本システムの特長の一つである簡易分析を用いた土壌の品質管理手法についても検証を行った結果、その有効性が確認された。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 土壌洗浄技術の原理
- § 3. オンサイト土壌浄化システムの概要
- § 4. 実証実験
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

土壌汚染対策法が平成 15 年 2 月に施行され、土壌汚染に対する社会的認識はますます高まっている。近年、土地の資産価値が高い都市部の工場・事業所やガソリンスタンド等を統廃合して売却し、集合住宅やオフィスビルに転用する事例が増えている。不動産の売買契約に際しては、土壌汚染の有無が不動産鑑定評価額に影響を及ぼすため、土地所有者が自主的に土壌汚染調査を行うことが一般になりつつあり、このような自主的な調査の結果、汚染が判明する例は少なくない。

汚染が判明した土地の資産価値低下を防ぐためには、汚染原因物質を除去または分解して無害化する浄化対策が求められ、それを満足する浄化技術のニーズが高まっ

ている。これまで重金属で汚染された土壌の処理・処分方法としては、掘削した土壌に不溶化処理を施した後に、産業廃棄物の管理型最終処分場に埋立て処分する方法や、セメント原料化が主として用いられてきた。しかしながら、管理型最終処分場の新たな用地確保が難しいこと、また、処分費が高いこと等の問題点があり、より安価な処理・処分方法の技術開発が望まれている。

このようなニーズに応える技術の一つとして、当社は、汚染現場に搬入でき、現場内で汚染土壌を洗浄して浄化する「オンサイト土壌浄化システム (Mr. ラクーン)」を開発した。本報では、土壌洗浄の浄化原理と本システムの概要について述べるとともに、実証実験による性能評価結果について報告する。また、本システムの特長の一つである簡易分析技術を用いた土壌の品質管理手法について検証を行った結果についても合わせて報告する。

§ 2. 土壌洗浄技術の原理

土壌汚染対策法の対象となる汚染物質(特定有害物質)は、第一種特定有害物質として揮発性有機化合物、第二種特定有害物質として重金属類、第三種特定有害物質として農薬・PCB に分類され、鉛、砒素、トリクロロエチレン等の 26 物質が指定されている。また、この他に

*土壌浄化プロジェクトチーム

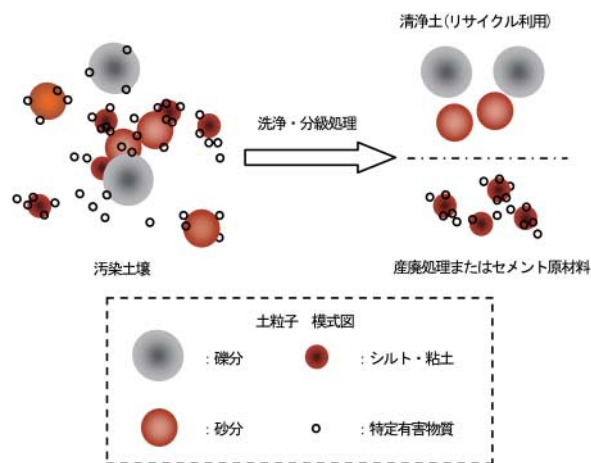


図-1 土壌洗浄技術の原理

対象外ではあるものの油膜・油臭等で問題となる鉱物油類が挙げられる。これらの有害物質のうち、一般的に土壌洗浄技術の適用対象となるのは、第二種特定有害物質（ただし水銀とシアンは特に有害性が高く、取り扱いが困難なため当社では適用対象外としている）、第三種特定有害物質ならびに油汚染土壌である。

土壌洗浄技術の原理を図-1に示す。一般的に土壌を汚染する重金属は、単位体積あたりの表面積（比表面積）が大きい細粒分（シルト、粘土）に多く吸着すると考えられている¹⁾。土壌洗浄は、この性質を利用し、土壌粒子をいくつかの粒度区分に分級しながら、有害物質を水側に移行させ、細粒分に付着・吸着させた後、凝集沈殿などの濁水処理を行うことで有害物質を除去する。その際、上澄水は再度洗浄水として循環的に利用する。一方、有害物質が濃縮された沈殿は脱水過程を経て脱水ケーキとして処分する。

この技術の特長として次の点が挙げられる。

- ①対象汚染物質の含有量を低減できる。
- ②大量の処理が可能である。
- ③土壌に対して質的変性を及ぼさないため、浄化した土壌はリサイクルが可能である。
- ④有害物質を脱水ケーキに濃縮して減量化することにより、汚染土壌を全量廃棄する場合に比べて処分費を大幅に低減できる。

§ 3. オンサイト土壌浄化システムの概要

3-1 土壌洗浄プラントの概要

土壌浄化技術は、汚染土壌を場外搬出して処理する方法（off-site）、汚染土壌を掘削して現場内で処理する方法（on-site）、または、原位置で土壌を掘削せずに処理する方法（in-situ）の3つに分類される。このうち on-site や in-situ では現場内で浄化および埋め戻しを行うため運搬費がかからず、また、場外搬出による汚染の拡散リスクが発生しないため、安全に処理することができる。



写真-1 土壌洗浄プラント全景（防音壁取付前）

(1) システムの特徴

今回開発したオンサイト土壌浄化システムは、市街地での浄化ならびに埋め戻しを想定した現場内処理用の土壌洗浄システムである（写真-1）。プラント本体は設置面積が約 320m² とコンパクトである。

このシステムの特徴として次の事項が挙げられる。

- ①車両輸送に適応したユニット式のプラントであるため再組立がしやすく、組立・設置に約 1 週間、解体・撤去も短期間で完了できる。
- ②現場内で土壌を浄化し、埋め戻すため、汚染土壌の運搬費および最終処分費が削減でき、大幅なコストダウンが可能である。
- ③プラント全体を防音壁で囲うことで騒音・振動を低減化している。また洗浄水を循環再利用するため、施工中の排水が無く、低公害型浄化プラントである。

(2) 設備概要

本プラントは土壌の洗浄・分級を行う設備と、洗浄に用いる水を処理する設備の2つから構成されている。土壌の処理能力は時間当たり 15t、1日当たり 7 時間稼働で 105t である。本プラントを用いた土壌浄化処理フローを図-2に示す。以下、フローの順に説明する。

- ①投入ホッパにバックホウで汚染土壌を投入する。投入ホッパの上部にはバイブレーティンググリッド（振動ふるい）があり、粒径 80mm 以上のコンクリートがらや礫等の瓦礫類をふるい分ける。これらの瓦礫類は産業廃棄物として処分する。80mm 以下の土砂はベルトフィーダによって定量的かつ連続的にプラントに供給され、途中に磁選機（永久磁石を利用して鉄屑等を取り除く機器）を備えたベルトコンベヤによってプラント内に運ばれる。
- ②汚染土壌は、まずパドルウォッシャへ投入される。パドルウォッシャは 2 軸式ミキサで構成されており、汚染土壌に洗浄水を適切な混合比で効率良く混合し、解砕効果により細粒分を分離し、水側に移行させる。

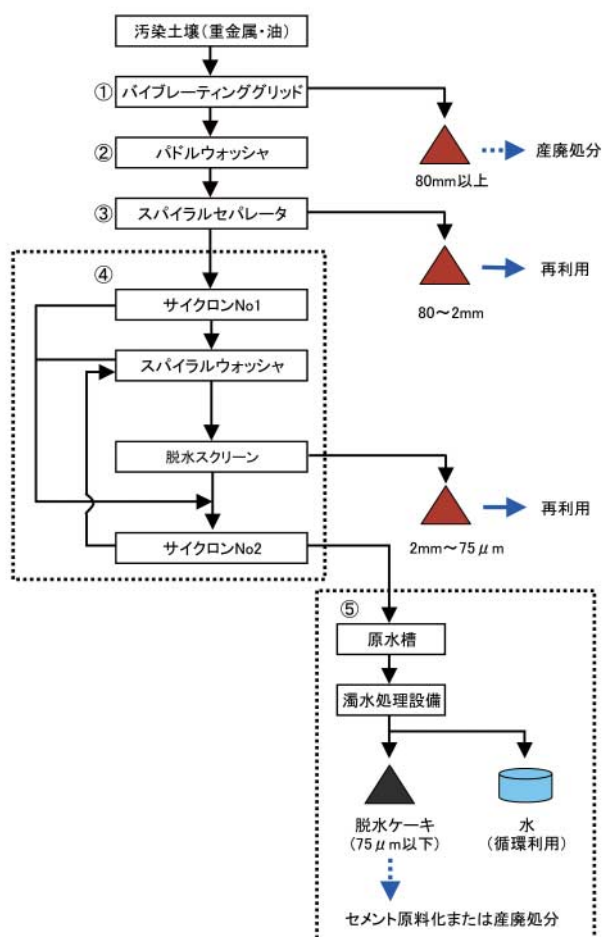


図-2 土壌浄化システムフロー

- ③粒径 80～2mm の土壌は、パドルウォッシャからその下部にあるスクリーンに入り、散水しながらふるい分けられる。さらに、スパイラルセパレータによりゴミ取りと水切りが行なわれ、洗浄処理土（以下、処理土と記す）としてベルトコンベヤでストックヤードに排出される。
- ④粒径 2mm 以下の土壌は、スクリーン下の水槽に移行した後、サイクロン No.1, No.2 に送られ、粗粒分と細粒分に分級される。その後、細粒分以下は濁水処理設備に、粗粒分はスパイラルウォッシャにて洗浄されたのち脱水スクリーンで脱水され、最終的に粒径 2mm～75 μ m の処理土として、ストックヤードに搬出される。
- ⑤濁水処理設備に送られた細粒分以下の土粒子を含んだ泥水は、シックナーに送られ、凝集沈殿処理により処理水とスラリーに分けられる。処理水は洗浄用に再利用するため循環水槽へと送られる。一方、スラリーはシックナー底部から引き抜かれ、スラリー槽を経てフィルタープレスにかけられ、汚染物質を含有する脱水ケーキとして排出される。脱水ケーキはセメント原料として再利用するか、あるいは産業廃棄物として処分する。

(3) 最適処理条件に適用可能な設備

汚染土壌は粒度分布や汚染物質の種類および濃度により水との混合比が異なる。パドルウォッシャは散水量と傾斜角を調節することで所定の混合比と滞留時間を実現でき、最適な処理条件で稼働させることができる。また、鉱物油類による汚染土壌を対象とした場合には、油分を土壌から効率的に剥離させ水側に移行させる手段として、界面活性剤等の薬剤を適用することもできる。

3-2 本システムにおける土壌の品質管理

土壌の品質管理は大別して、①汚染土壌の受入妥当性評価、②トリータビリティ試験、③浄化処理の際に実施する。品質管理のフローを図-3 に示す。

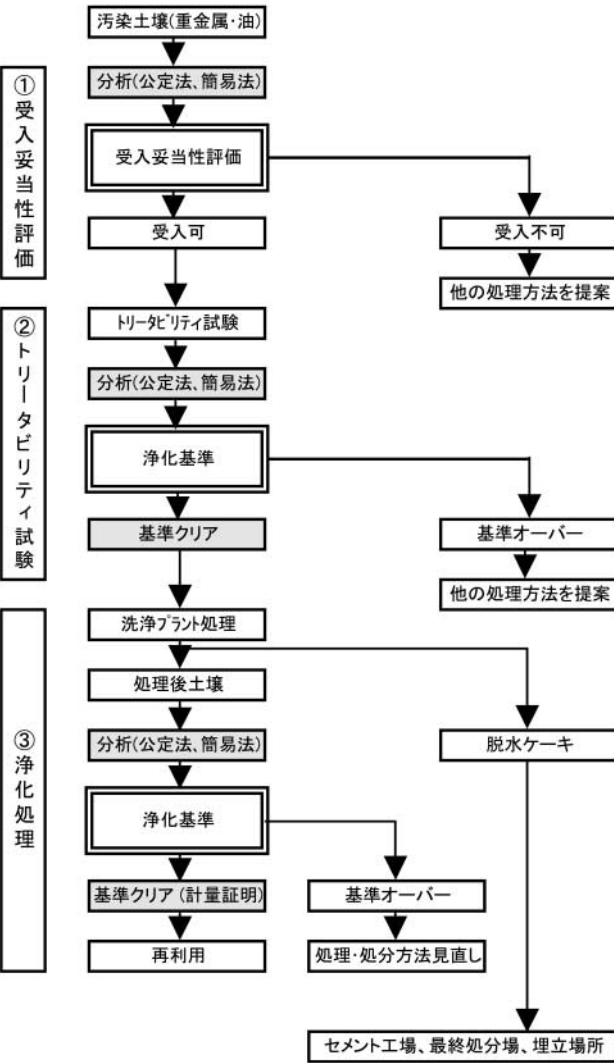
①汚染土壌の受入妥当性評価とは、対象とする汚染土壌が本システムで洗浄処理可能か否かを、顧客所有のデータならびに受入前の分析（公定法および簡易法）によって判断するものである。この場合、簡易分析として重金属汚染土壌では蛍光 X 線分析装置（写真-2）によりその含有量を、また、油汚染土壌では簡易油分計（写真-3）により油分含有量を、さらに油膜、油臭の有無を確認する。

次に、②トリータビリティ試験では、汚染サイトから採取した試験対象土壌に対し、パン型ミキサ（写真-4）や円形ふるい等を用いて実プラントを模擬した浄化試験を行う。なお、細粒分への汚染物質の濃縮を高める要因となる、土壌と水の混合比などの最適処理条件はこのトリータビリティ試験にて設定する。試験で得られた処理土の評価・分析は公定法ならびに簡易法によって行う。これまでに得られた実証実験結果から、トリータビリティ試験結果と実プラント試験結果の相関性が良好であることを確認しており、実際のプラントでの浄化性能を事前に推定することができる。

最後に、③浄化処理の確認では、処理土を迅速に埋め戻すための判断基準および日常の品質管理の手段として簡易分析結果を、また、埋め戻した土壌の品質と信頼性を顧客に提示するための証明として公定分析結果（計量証明）を利用する。公定分析の実施頻度は、環境省の「汚染土壌浄化施設の構造及び維持管理の指針」（平成 16 年 6 月）に基づき一日 1 回を基本とする。公定分析に供する検体は、一日の処理土量（最大 100m³）に対して 20m³毎にサンプリングし、等量を混合したものである。

公定分析は一般に計量証明事業所に委託して実施するが、結果が得られるまでに通常 1 週間以上を要する。工期に余裕のない工事現場では、処理土の埋め戻し作業を迅速に行うにあたり、この公定分析結果を待つ時間は大きな障害となり、工事が長期化する要因となる。これを解決する手段として簡易分析を有効活用する。当社の簡易分析技術は、試料の前処理と測定時間を合わせてもわずか 90 分程度で結果を得ることができる²⁾。この簡易分析による品質管理は、事前に公定分析との相関性を確

認して相関関係式を構築し、簡易分析値を相関関係式に当てはめて得られる公定分析値の推定値をもとに、処理土が基準値を満足したか否かを判定するものである。



図ー3 品質管理フロー



写真ー2 蛍光 X 線分析装置



写真ー3 簡易油分計



写真ー4 トリータビリティ試験用パン型ミキサ

§ 4. 実証実験

4ー1 汚染除去性能確認実験

(1) 実験目的
 鉛、砒素、鉱物油類（以下、油と記す）を含む 14 ケースの汚染土壌（複合汚染または単一汚染）を使用し、本システムによる汚染物質の除去性能を確認するため実証実験を実施した。

(2) 実験方法
 原土の分析を行い汚染の状態を確認した 14 ケースの汚染土壌（表ー1）を用意し、それぞれを洗浄プラントに投入した。本システムにより洗浄・分級されて得られた処理土に残存する鉛、砒素および油分の含有量を公定分析（鉛と砒素は環境省告示第 19 号 1mol/ℓ 塩酸抽出法、油分は下水試験方法・一般汚泥試験に基づく n-ヘキサン抽出重量法、以下 n-hex 法と記す）によって評価し、汚染物質の除去性能を検証した。

なお、油汚染土壌に対しては、水洗浄した場合と界面活性剤を添加して洗浄した場合の 2 通りの方法を実施し、油分除去性能を調べた。また、油の評価にあたっては現状、基準がないため、浄化目標として①油分含有量

表ー1 原土の汚染状況

種 類	サンプル数	含有量 (mg/kg)
鉛汚染土壌	2	鉛 105～135
鉛および砒素汚染土壌	5	鉛 1,000～4,450 砒素 75～1,300
油汚染土壌	6	油 1,750～3,950
鉛および油汚染土壌	1	鉛 495 油 1,850

1,000mg/kg 以下, ②油膜無し, ③油臭無し, ④ベンゼン溶出量基準 (0.01mg/ℓ) 以下の4項目を満たすこととした。ベンゼンに関しては供試土壌 (原土) はすべて基準以下であったが, 洗浄処理後の変化を確認するため設定した。

(3) 結果

洗浄処理による鉛含有量の低減効果を表すグラフを図-4に示す。処理土の含有量 (縦軸) は浄化前の原土の含有量 (横軸) に対して正の強い相関が確認され (相関係数 $r=0.933$), 洗浄による鉛除去率は平均 64% であった。この除去率をもとに基準値 150mg/kg 以下を満足する原土の含有量上限は 418mg/kg と算出された。

砒素含有量の低減効果を表すグラフを図-5に示す。鉛と同様に, 処理土と原土の含有量は正の強い相関が確認され ($r=0.957$), 洗浄による砒素除去率は平均 58% を示した。この除去率をもとに基準値 150mg/kg 以下を満足する原土の含有量上限は 354mg/kg と算出された。

次に, 油汚染土壌について7ケースの実験を実施した結果を表-2に示す。なお, 供試土壌の No.1, No.2, No.3 はそれぞれ異なる汚染サイトから採取した土壌であり, No.3-1 から No.3-5 は同じサイトから採取した土壌である。

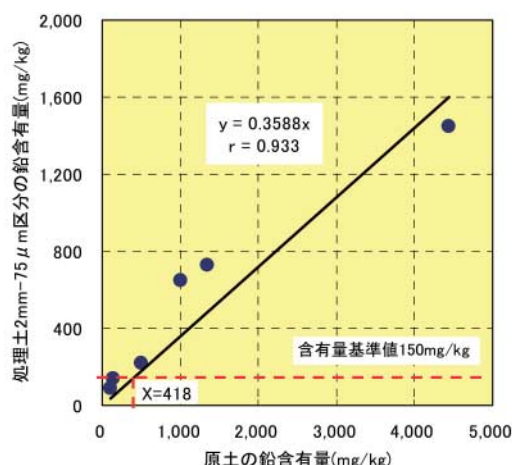


図-4 洗浄処理による鉛含有量の低減効果

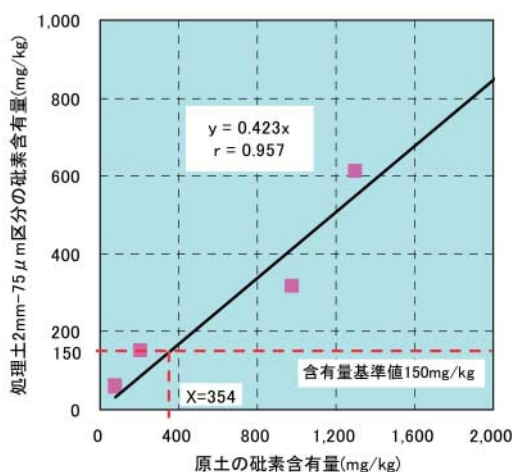


図-5 洗浄処理による砒素含有量の低減効果

表-2 鉱物油汚染土壌の洗浄処理結果

供試土壌	評価項目	油分含有量 (mg/kg)	同左除去率	油膜	油臭	ベンゼン溶出量 (mg/ℓ)
	原土 (油種不明)					
No.1	原土	1,850		なし	なし	不検出*
	処理土	1,020	45%	なし	なし	不検出
No.2	軽質油含有原土	1,750		なし	なし	不検出
	処理土	1,040	41%	なし	なし	不検出
No.3-1	A重油含有原土	3,950		あり	あり	不検出
	処理土	960	76%	なし	なし	不検出
No.3-2	A重油含有原土	3,550		なし	なし	不検出
	処理土	500	86%	なし	なし	不検出
No.3-3	A重油含有原土	3,800		なし	なし	不検出
	界面活性剤処理土	<500	>87%	なし	なし	不検出
No.3-4	A重油含有原土	1,850		なし	なし	不検出
	界面活性剤処理土	<500	>73%	なし	なし	不検出
No.3-5	A重油含有原土	3,650		なし	なし	不検出
	界面活性剤処理土	<500	>86%	なし	なし	不検出

注: *ベンゼンの「不検出」は定量下限値 0.001mg/ℓ 未満を表す。

水で洗浄した土壌 (表-2 で処理土と記した土壌) は4ケース中2ケース (No.3-1 と No.3-2) において浄化目標を達成した。一方, 残りの2ケース (No.1, No.2) についても, 油分含有量のみ浄化目標 1,000mg/kg を満足しなかったものの, 1,020mg/kg および 1,040mg/kg と目標値にきわめて近い値を示した。さらに, 界面活性剤で洗浄した土壌については, 全ケース (No.3-3, No.3-4, No.3-5) において定量下限値 500mg/kg 未満を達成した。なお, 水で洗浄した No.3-1, No.3-2 と界面活性剤で洗浄した No.3-3, No.3-5 はいずれも原土の汚染レベルが同程度であることから, 浄化目標の達成には水による洗浄で十分であることを確認した。また, ベンゼン溶出量はすべての土壌において洗浄後の変化は見られず, 基準を満足した。

(4) 考察

鉛および砒素の含有量に関して, 実際の汚染対策物件における濃度レベルについて分析機関および汚染土壌受入施設にヒアリング調査を行った。その結果, 鉛については約 6 割が指定基準 (150mg/kg) の3倍程度以内 (450mg/kg 以下) であり, 砒素についてはほとんどが指定基準以下 (150mg/kg 以下) であると想定された (砒素は溶出量の汚染が問題となるケースが少なくない)。該当レベルの汚染土壌は, 実験結果から本技術によってほぼ基準を満足できると判断した。しかしながら, 重金属汚染土壌に対する洗浄の効果は土質や汚染物質の化学形態によって異なると考えられる。今後, 浄化事業を進める中でデータを蓄積し, 洗浄処理の適用範囲を明確化していきたい。

油汚染土壌については, 約 4,000mg/kg の汚染を浄化する能力を確認した。都市部において発生する油汚染土壌の濃度はおよそこの程度と想定されるが, 鉱物油はその種類と物理化学的性状の違いによって洗浄効果が

きく異なると考えられる。例えば、タール状の油分を多く含有する重質油による汚染土壌に対しては、4,000mg/kg以下の油分含有量であっても浄化目標を満足することが困難な場合があると考えられる。このような土壌に対しては界面活性剤の適用によって洗浄効果の向上が期待されるものの、限界があると考えられる。今後、実際の浄化事業で取り扱う油汚染土壌について、油種と洗浄効果についてのデータをさらに蓄積し、洗浄処理の適用範囲ならびに適用限界を把握する必要がある。

4-2 簡易分析を用いた土壌の品質管理に関する検証実験

(1) 実験目的

4-1の実験において、公定分析との比較のため簡易分析を併せて実施し、鉛、砒素、油分の含有量に関する簡易分析値と公定分析値の相関関係を調べた。その結果、相関係数はいずれも0.9以上を示し、強い相関性を確認した(図-6(a)~(c))。本実験では、得られた相関式をもとに簡易分析による土壌の品質管理の適用性を検証した。

(2) 実験方法

鉛汚染土壌の原土(鉛含有量のみが基準を超過した土壌)と処理土に対し簡易分析を行い、得られた値をもとに先の相関関係式から推定した鉛含有量(公定分析相当)による品質管理の妥当性を確認した。

(3) 結果および考察

実験結果を表-3に示す。品質管理を行う上では簡易分析によって安全側に評価できることが望ましい。今回の結果では、4つの土壌のうち処理土2を除く3つの土壌で安全側に評価できた。処理土2についても実測値115mg/kgに対して、推定値は113mg/kgを示し、公定分析の繰り返し精度が一般に±10%程度であることを考慮すれば、両者には差がないと判断できる。したがって、本実験の結果、簡易分析を併用することにより土壌の品質管理が迅速かつ適切に実施できることが検証された。しかしながら、現段階では相関関係式の構築とその検証に用いたデータがまだ少ないため、今後さらにデータを蓄積し、相関関係式の精度を向上させていく必要がある。

§ 5. おわりに

本システムの技術課題として以下の事項が挙げられる。

- ・汚染物質および濃度レベルに関する適用範囲の把握
- ・脱水ケーキの減量化(産廃処分費削減のため)
- ・重金属溶出量に関する簡易迅速分析技術の開発

今後、土壌汚染対策事業を進める中で上記課題を克服して技術向上を図り、競争力を高めていく所存である。

本事業を通じて顧客との信頼関係をより一層高め、受注拡大に繋げるとともに、環境保全対策事業という新たな切り口から新規顧客の開拓にも貢献していきたい。

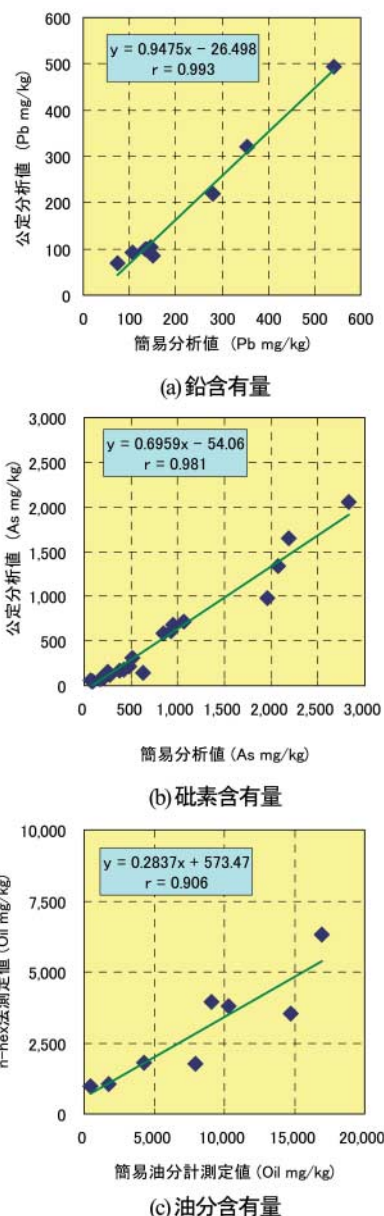


図-6 公定分析と簡易分析の相関関係

表-3 簡易分析を用いた土壌の品質管理結果

項目	供試土壌	原 土	処理土 1	処理土 2	処理土 3
簡易分析値 (鉛 mg/kg)		621	116	147	165
公定分析 推定値 (鉛 mg/kg)		562	83	113	130
公定分析 実測値 (鉛 mg/kg)		410	51	115	105
推定値/実測値		1.37	1.62	0.98	1.23
安全側評価 (推定値>実測値)		○	○	×	○

参考文献

- 1) 野本他：土壌洗浄技術における清浄度向上のための検討，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，pp.515-516，2004。
- 2) 山崎他：簡易分析技術を用いた重金属および油汚染土壌の品質管理，第10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，pp.104-106，2004。