

(35) 汚染土壌中の鉛の含有量と溶出量の関係とpH影響

亀屋 隆志^{1*}・大橋 優子^{1,2}・小林 剛¹

¹横浜国立大学大学院環境情報研究院 (〒240-8501横浜市保土ヶ谷区常盤台79-7)

²応用地質(株)中部支社ジオテクニカルセンター (〒463-8541名古屋守山区瀬古東2-907)

* E-mail: kameya@ynu.ac.jp

過去の履歴調査等で土壌汚染のおそれがあった4サイトの39ポイントについて土壌の溶出量試験と含有量試験を行った。土壌pHは、同じサイト内でも1.4から2.6と異なり、土壌pHがほぼ同じなら溶出量は含有量が大きい土壌ほど大きくなる定量的な相関が認められた。各種土壌からの鉛の脱離平衡の等温線は吸着平衡の等温線とほぼ一致し、含有量と溶出量試験での溶出量に対するpH影響は、定量的な二成分系の脱離等温式を用いることで、いずれの土壌においても近似的に解釈できた。含有量試験において含有量の確実な測定を行った上で、その結果と溶出量試験の結果をpH影響を考慮して定量的に解析することで、鉛土壌汚染の的確な汚染実態やさらなる汚染拡大の可能性の評価などが可能となることがわかった。

Key Words : soil & groundwater contamination, lead, elution test, content test, pH dependence

1. はじめに

重金類の土壌・地下水汚染の調査では、土壌の溶出量と含有量の測定を行なうことになっている。含有量試験は、風などにより飛散した土壌の巻き上げ等による摂取を想定したものであり、基準値が定められた重金類について過去の履歴調査などから汚染の懸念が生じた土地(サイト)において土壌の表面が被覆されていない場合での暴露の可能性を調べたり、土壌中に強固に残留する潜在的な汚染の有無を調べるために行われている。一方、溶出量試験は、重金類が降雨などによる水の浸透とともに汚染された土壌から溶出して地下水を汚染することを想定したものであり、地下水経路での環境負荷量や人への暴露の可能性および溶出液を介しての付近の土壌への汚染の広がりやすさを判断するために行われている。これらの試験に関する解析事例として、調査目的は異なるが、廃棄物や道路粉塵を対象とした研究事例¹⁾²⁾がある。また、諸外国では、土壌含有量の基準のみの設定である場合が多い³⁾ことから、これまで土壌の溶出量と含有量との関係を定量的に比較評価する事例は多くないが、金属の土壌への吸着は、pHや土壌有機物もしくは土壌中金属濃度の影響を受けるという知見がある⁴⁾。日本国内の土壌汚染調査においては、汚染の規模とその

拡大をより詳細に評価するために、2つの試験を同時に行おうとする場合がほとんどである。しかし、汚染が懸念されるサイトで面的・立体的に多数の調査ポイントを設けて溶出量や含有量を調査したくても、2つの試験を行うとなれば必然と検体数が増えるため、コストの制約もあって、対策に必要なできるだけ細かな技術的情報を十分に入手できていない場合も多い。例えば、試料の採取が容易な表層土壌の試験において、含有量は基準に適合したものの、溶出量が不適合であるといったようなケースでは、深度方向の土壌汚染調査は少なくとも溶出量試験のみ行えばよいことになっている⁵⁾。しかし、この汚染土壌を掘り起こして処理する段階になると、今度は含有量基準を超過していないことを確認した上で適切に処理する必要が生じる。このような場合に、溶出量の試験結果から含有量を予測できれば、例えば、汚染土壌の適切な処理量を迅速に把握できるなど、多大な労力を要する土壌汚染調査を効率的に進めることが可能となる。

また、土壌からの溶出量試験においては、重金類の溶解度やイオン形態に大きく関係する土壌pHが強く影響を及ぼす⁶⁾⁷⁾が、土壌pHは土壌の風化や緩衝作用の低下に伴って変化し、時間が経つにつれて溶出量が増減する可能性も指摘されている⁸⁾⁹⁾。特に、着目する重金類の濃度が環境基準値レベルのような場合には、同じ

カチオン同士であるため競争的な影響を受けるので、溶出量は土壌 pH の影響を強く受ける¹⁰⁾。また、中性の水に土壌を浸す溶出試験では、強い緩衝作用を有する実際の土壌中とは異なる試験結果が得られることも多い。このため、溶出量試験の結果をもとにした重金属類の土壌汚染規模の把握やその拡大の可能性を判定する際には、調査を行う実際のサイトでの土壌 pH の分布についても的確に把握しておく必要がある。

これに対し、著者らはこれまでに、pH コントロール下での各種重金属類の土壌への吸着平衡関係を調べ、その際の吸着量に対する pH 影響を定量的に把握する方法を提案して検証してきた¹⁰⁾。そこで本報では、土壌環境基準値の付近の汚染事例が極めて多く¹¹⁾、pH により土壌への吸着量が大きく異なる鉛について、土壌の種類や含有量の異なる実際の汚染土壌についての溶出量試験と含有量試験を同時に実施し、溶出量と含有量との関係を検討するとともに、その際の pH 影響を合わせて明らかにし、溶出量試験および含有量試験の結果を用いて効率的な汚染対策方法を実施するための基本情報を得ることを目的とした。

2. 方法

2.1 土壌試料

土壌試料は、実際の汚染が懸念された愛知県 2 サイト、三重県 1 サイト、大阪府 1 サイトの 4 サイト 39 ポイントで採取した土壌を用いた。過去の履歴調査等から汚染が懸念されたサイトにおいて、土壌を採取する深度として、被覆コンクリートや埋設されているガラ、碎石、レンガ等を取り除いた後、0m~0.05m および 0.05m~0.50m の二区分からそれぞれ採取したものを、それぞれ等量ずつ十分に混合して 1 ポイントの試料とした⁹⁾。4 サイトの土壌は、土の工学的分類方法の中分類¹²⁾を参考にすると、大きく分けてそれぞれ礫質土、砂、砂質土、シルトに区分されるものであった。採取した土壌は、環境省告示第 19 号(平成 15 年 3 月)の土壌含有量調査¹³⁾や環境庁告示第 46 号の付表¹⁴⁾に準拠して、風乾し、中小礫、木片等を除き、土塊、団粒を粗砕した後、非金属製の 2mm の目のふるいを通過させて十分に混合した。

2.2 土壌 pH の測定方法

土壌 pH とは、土壌を水に入れて十分にかけ混ぜた懸濁液の pH のことであり、土壌が有する固有の性質としてではなく、(社)日本土壌肥科学会の「土壌環境分析法」¹⁵⁾において所定の測定法に準拠して実施した。

2.3 土壌の溶出量試験¹³⁾および含有量試験¹³⁾

土壌の溶出量試験および含有量試験は、環境省告示第 18 号(平成 15 年 3 月)の土壌溶出量調査¹³⁾及び環境省告示第 19 号(平成 15 年 3 月)の土壌含有量調査¹³⁾に準拠して実施した。なお、分析方法としては、ICP-AES (Jobin-Yvon, JY138)を用いた。

また、溶出試験終了後に土壌中に残存する鉛の含有量 $Q_{R'} \text{ (mg/kg dry)}$ は、(1)式により、元の汚染土壌中の鉛の含有量 $Q_R \text{ (mg/kg dry)}$ から溶出試験での溶出量分を差し引くことで求めた。また、 C_R は溶出試験での鉛の溶出量 (mg/l) 、 V は溶出液量 (l) 、 W は湿潤土壌重量 (kg-wet) 、 α は汚染土壌の含水率 (一) である。

$$Q_{R'} = Q_R - \frac{C_R \cdot V}{W \cdot (1 - \alpha)} \quad (1)$$

2.4 溶出時の脱離平衡の解析

重金属類の土壌間隙水中の濃度と土壌への吸着量との関係については、Freundlich 式¹⁷⁻²⁰⁾や Langmuir 式^{17, 21, 22-24)}などの吸着平衡式を用いて検討がされている。しかしながら、これらの吸着平衡式では、土壌ごとに大きく異なる共存物質の影響についてはほとんど考慮されておらず、共存物質の影響を定量的に表現できる方法が望まれる。これに対し、筆者らは鉛を含む種々の金属カチオンについて、各種土壌への共存物質存在下での吸着に利用できる(2)式の二成分系吸着等温式¹⁰⁾を提案している。

$$Q_n = \frac{Q_{\max}}{1 + \frac{C_H^{n_H}}{S_H^{n_H}} \cdot \frac{1}{C_R^{n_R}}} \quad (2)$$

C_R は吸着時の鉛イオンの平衡濃度 (= 溶出試験での鉛の溶出量) (meq/l) 、 Q_n は吸着時の鉛イオンの平衡吸着量 (= 溶出試験終了後に土壌中に残存する鉛の含有量) (mg/kg dry) 、 C_H は共存する水素イオン濃度、 n_R と n_H は鉛イオンおよび共存する水素イオンそれぞれのカチオン吸着定数 (一) 、 $S_H^{n_H}$ は鉛イオンと水素イオンとの間の選択係数 $\text{((meq/l)}^{n_H+n_R})$ 、 $Q_{\max}$ は最大カチオン吸着量 (meq/kg dry) である。

(2)式は、 C_R が十分小さい場合、(3)式のような式で近似できる。すなわち、有害金属カチオンが低濃度の場合には、平衡吸着量 Q_n と平衡濃度 C_R との関係が、設定した共存物質の各濃度ごとに両対数で直線近似できることになる。

$$Q_n = \frac{Q_{\max} \cdot S_H^{n_H}}{C_H^{n_H}} \cdot C_R^{n_R} = \frac{K_{Pb}}{C_H^{n_H}} \cdot C_R^{n_R} \quad (3)$$

本研究では、溶出量と含有量が環境基準値レベルである場合を想定して両者の関係を検討することとし、高濃度域を含まない(3)式を用いた。ここで、鉛の吸着・脱離のしやすさは、(3)式の $Q_{\max} \cdot S_H^{n_H}$ (= $K_{Pb} \text{ (meq/kg dry)}$

$^{1+}$ (meq/l^{+})と共存する水素イオン濃度 C_H (meq/l^{+}) に影響される。なお、溶出試験時に水中へ溶出する成分は、イオン交換が主であると考えられるので、(2)式(3)式は重量濃度ではなく、イオン当量で考えることとした¹⁰⁾。

3. 結果

3.1 土壌の種類が異なる各サイトでの土壌 pH の違い

礫質土のサイト 1 の 6 ポイント、砂のサイト 2 の 7 ポイント、砂質土のサイト 3 の 13 ポイント、シルトのサイト 4 の 13 ポイントで測定した土壌 pH を表-1 に示す。

まず、サイト間での違いを比較すると、砂質土のサイト 3 は pH が 1.7~4.1 の強い酸性であり、礫質土のサイト 1 は弱酸性から中性付近、砂のサイト 2 およびシルトのサイト 4 は中性付近であった。特に、土壌 pH が強酸性を示す砂質土のサイト 3 では、土壌中に黄鉄鉱などが含まれており、空気との接触により酸化が生じて硫酸が生成された結果としてかなり強い酸性土壌になっていたと考えられる。このように、土壌 pH はサイトによっても大きく異なることがわかった。

また、同一サイト内で採取した土質区分の同じ土壌であっても、採取したポイントごとに pH に有意な違いがみられ、礫質土のサイト 1 では最大で 2.6 の差、砂のサイト 2 では最大で 1.4 の差、砂質土のサイト 3 では最大で 2.4 の差、シルトのサイト 4 では最大で 1.4 の差があった。これは水素イオン濃度でみると、25 倍から 400 倍の差となり、鉛の溶解度や土壌への代表的なカチオンである水素イオンとの競争的な吸着性に大きな影響を及ぼしうる範囲であると考えられた⁹⁾。

ここで、鉛の溶解度曲線によると⁷⁾、上記の pH 範囲で二価のカチオンとして存在する鉛の溶解度は、pH が 1 だけ低下する毎に 100 倍上昇し、鉛が溶液中に存在しやすい状態となる。従って、溶出量試験を行った場合には、同じサイトであるにもかかわらず、土壌 pH の違い

に応じて溶解度が指数的に変化するので、溶出量が大きく影響を受ける場合があることも十分に予想される。

以上のことから、土壌中からの重金属類の溶出量の調査を行う際には、将来土壌 pH の変化によって溶出量が変わることも考えられるため、各調査ポイントにおいて土質の違いだけではなく、測定が容易な土壌 pH も実測しておくことが有用であると言える。

3.2 溶出量と含有量およびその pH 影響

各調査ポイントの土壌からの鉛の溶出量および含有量を同時に調べた結果を図-1~図-4 に示す。

鉛の溶出基準値および含有量基準値の超過の有無を調べた場合、測定した 39 ポイントのうち、溶出量基準値および含有量基準値の両方での超過が 3 ポイント、溶出量基準値のみでの超過が 20 ポイント、含有量基準値のみでの超過が 0 ポイントであり、両方での基準を達成した調査ポイントは 16 ポイントであった。このように溶出量基準を超過するポイントが多くなった理由としては、今回の調査ポイントで土壌 pH が塩基性を示す場合がほとんどなく、鉛の溶解度が高い土壌 pH であったためと考えられる。つまり、鉛は、酸性側で溶液中に存在しやすいため、土壌 pH が中性から酸性を示す調査ポイントが多いサイトでの汚染調査においては、含有量基準を超過する場合よりは、むしろ溶出量基準を超過するケースが多いと考えられる。このようなサイトで同一サイト内をより詳細に現状把握したい場合には、溶出量試験を行うポイントを増やしてスクリーニングを行うのが効率的と考えられた。

また、溶出量が含有量に依存することは容易に想像されるが、本研究で同一サイト内において採取した土質区分の同じ土壌について、溶出量がほとんど同じであっても含有量が大きく異なる場合や、含有量がほぼ同じであっても溶出量が大きく異なる場合があった。この理由は、表-1 に示した各土壌試料における土壌 pH の違いにあると考え、図-1~図-4 の各データを表-1 の土壌 pH の値と比較しながら、表-2 に示した pH 範囲に区分してプロットを整理してみた。ここで、表-2 の pH 範囲の区分は、図中のプロットの形に対応しているが、表-1 をもとにしたおおよその区分であり、境界付近での違いを厳密に表しているものではない。この結果、含有量がほぼ同じ土壌であっても、pH が高いほど鉛の溶出量は小さくなる傾向が認められた。表-1 に示した土壌 pH の範囲では、鉛は 2 価のカチオンとして水に溶出すると考えられ、その溶解度の pH 依存性から考えれば、pH が高いほど溶出量が小さくなることが予想される。しかし、含有量と溶出量は、本来的に溶出前後の土壌を比べているため、このような平衡論的な考察をするには不十分なデータで

表-1 各サイト内の各調査地点での土壌 pH 結果

サイト内の 各調査地点	サイト1 礫質土	サイト2 砂	サイト3 砂質土	サイト4 シルト
No.1	3.8	6.2	1.7	5.8
No.2	3.8	6.3	2.2	5.8
No.3	4.2	6.6	2.5	5.9
No.4	4.3	6.8	2.7	6.0
No.5	6.2	7.3	2.7	6.0
No.6	6.4	7.4	3.3	6.0
No.7		7.6	3.3	6.0
No.8			3.3	6.4
No.9			3.6	6.4
No.10			3.6	6.6
No.11			3.6	6.6
No.12			3.6	7.2
No.13			4.1	7.2

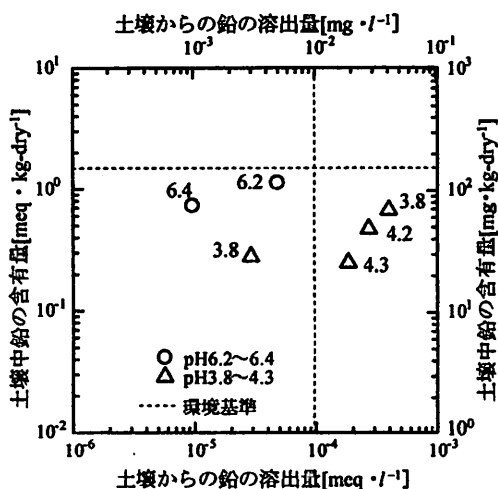


図-1 礫質土(サイト1)からの鉛の溶出量と含有量

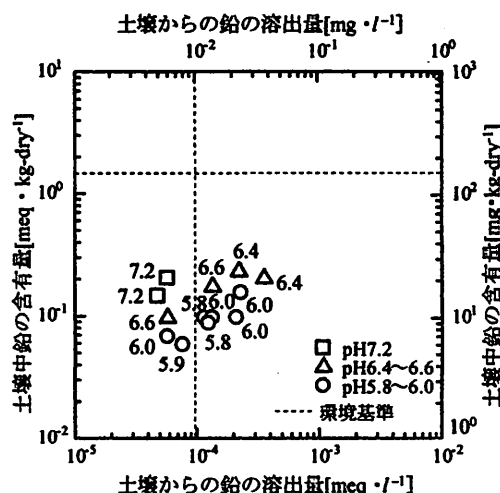


図-4 シルト(サイト4)からの鉛の溶出量と含有量

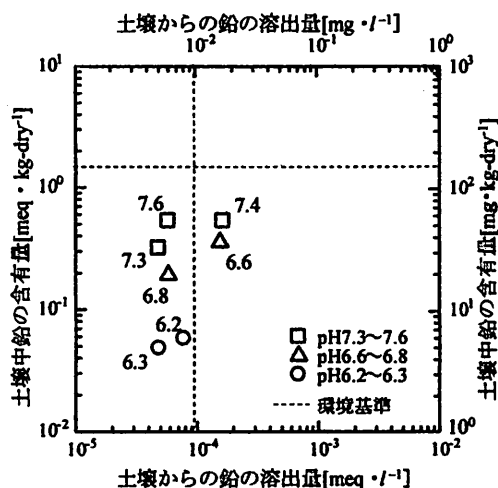


図-2 砂(サイト2)からの鉛の溶出量と含有量

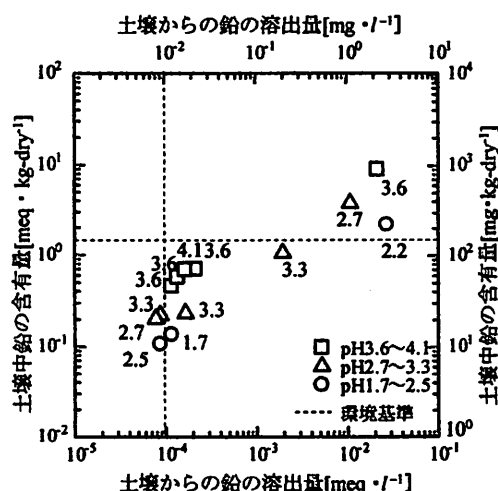


図-3 砂質土(サイト3)からの鉛の溶出量と含有量

表-2 用いた土壌中 pH の区分

土壌	サイト1 礫質土	サイト2 砂	サイト3 砂質土	サイト4 シルト
pH[-]	3.8~4.3 6.2~6.4	6.2~6.3 6.6~6.8 7.3~7.6	1.7~2.5 2.7~3.3 3.6~4.1	5.8~6.0 6.4~6.6 7.2

ある。そこで、次節において溶出試験終了時の脱離平衡における pH 影響に関して定量的な考察を行うこととした。

3.3 溶出試験時における脱離平衡関係

用いた公定法における溶出試験終了時には、脱離平衡状態にほぼ達しているとみなせると考え、溶出量試験と含有量試験の結果から脱離等温線を推定し、砂質土のサイト3の例を図-5に示した。ここで、横軸の脱離時の平衡濃度は溶出量試験での鉛の溶出量 C_{le} ($\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$)、縦軸は脱離時の平衡吸着量は溶出試験終了後の土壌中の鉛の含有量 Q_{le} ($\text{mg} \cdot \text{kg} \cdot \text{dry}^{-1}$) に等しい。これらの値を既報¹⁰⁾で明らかにした土壌中での金属類の pH 影響を考慮した吸着平衡の近似式 (3)式に適用して脱離平衡の解析を行った。

それぞれの pH 範囲において、(3)式の回帰線に対してデータのばらつきが若干見られるものの、脱離時の平衡濃度 (= 溶出試験での鉛の溶出量) C_{le} と脱離時の平衡吸着量 (= 溶出試験終了後の汚染土壌中の鉛の含有量) Q_{le} との関係は両対数グラフで直線近似でき、pH 影響を考慮した(3)式が溶出試験時の脱離平衡においても適用できると考えられた。このとき、両対数グラフの直線部分の傾きは、土壌の違いによらずほぼ一定とみなすことができ、(3)式の鉛イオン吸着定数 n_{le} として一定値 0.55 で近似できた。また、同じく(3)式で脱離時の平衡吸着量

Q_{ps} に対する pH (=水素イオン濃度 C_H) の影響度を表す水素イオン吸着定数 n_H は、異なる pH 条件の実験で得られた Q_{ps} 、 C_{ps} 、 C_H のデータセットを(3)式で重回帰分析を行うことにより求めることができる。図-5 のデータについて重回帰分析を行ったところ、(3)式が有意差 1% 以下で統計学的に有意であることが確かめられ、 n_H は一定値 0.60 でほぼ一致するとみなせる結果になった。また、(3)式で選択性を表す係数 K_{ps} も同様の重回帰分析で求めることができ、図-5 の砂質土で K_{ps} は 30 であった。なお、これらの n_{ps} 及び n_H の値は既報¹⁰⁾における砂質土への鉛の(3)式を用いた吸着側でのパラメータと同じ値であり、妥当な結果であることが確認できた。

そのほか、礫質土のサイト 1、砂のサイト 2、シルトのサイト 4 についてもそれぞれの pH 条件下においては、(3)式の回帰線に対しデータのばらつきが若干見られるものの、脱離時の平衡濃度 (= 溶出試験での鉛の溶出量) C_{ps} と脱離時の平衡吸着量 (= 溶出試験終了後の汚染土壌中に残存する鉛の含有量 Q_{ps}) との関係が両対数グラフで直線近似でき、いずれの土壌においても pH 影響を考慮した(3)式が脱離平衡でも成り立つことが確かめられた。

これは、土壌の種類が異なっても、溶出試験終了後の汚染土壌中に残存する鉛の含有量が、(3)式で示されるように水素イオンの影響を受けることを示していると考えられた。

以上において、同一サイト内の多地点の土壌試料での溶出量、含有量および土壌 pH を測定し、鉛イオンと共存イオンとの間の(3)式を選択係数 K_{ps} を求められたことから、鉛の土壌からの溶出量に対する pH 影響を定量的に把握できたと考えられる。

そこで、礫質土のサイト 1、砂のサイト 2、シルトのサイト 4 について、実測した鉛の含有量に対して、実測した溶出量と既報の吸着側の等温式およびそのパラメータを使って含有量を予測計算してみた。このとき、 n_{ps} の値は 0.55、 n_H の値は 0.60 とし、選択係数 K_{ps} については、一つの調査地点で得られた溶出量 C_{ps} 、含有量 Q_{ps} 、土壌 pH : C_H のデータセットを(3)式で重回帰分析して求めることができる。 K_{ps} の値を前述の砂質土と同様に求めたところ、礫質土が 7.5、砂が 0.15、シルトが 0.17 であり、これより予測計算した鉛の含有量と実測した溶出量および含有量を比較した結果を図-6～図-9 に示す。これより、実測値に比べて予測計算値は、礫質土のサイト 1 の場合に 0.8～2.0 倍、砂のサイト 2 の場合に 0.8～1.4 倍、シルトのサイト 4 の場合に 0.6 倍～1.6 倍程度のばらつきがあったが、倍半分程度の予測の誤差を許容できる場合には、含有量のおおまかな見積もりが可能性であった。

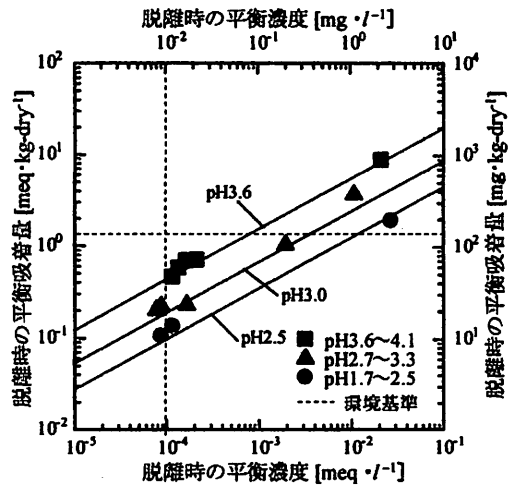


図-5 鉛の脱離時の平衡濃度と平衡吸着量(砂質土)

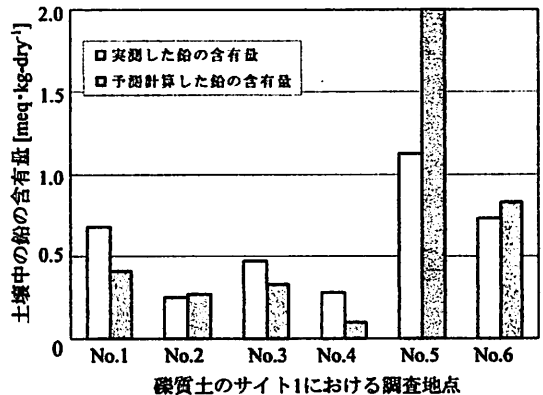


図-6 礫質土における鉛の含有量の実測値と予測計算値

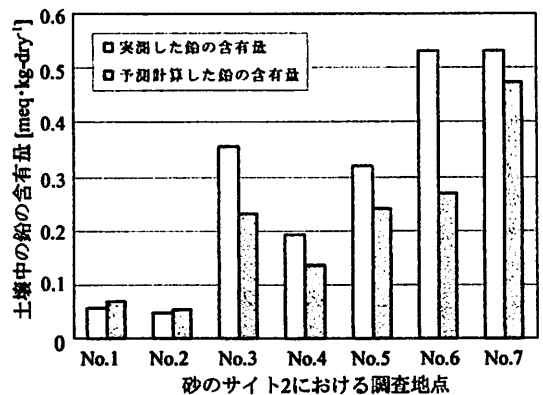


図-7 砂における鉛の含有量の実測値と予測計算値

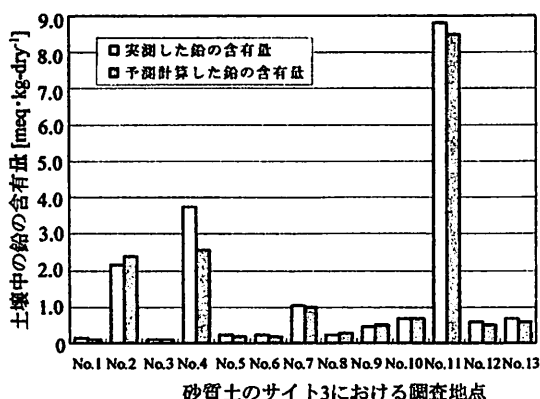


図-8 砂質土における鉛の含有量の実測値と予測計算値

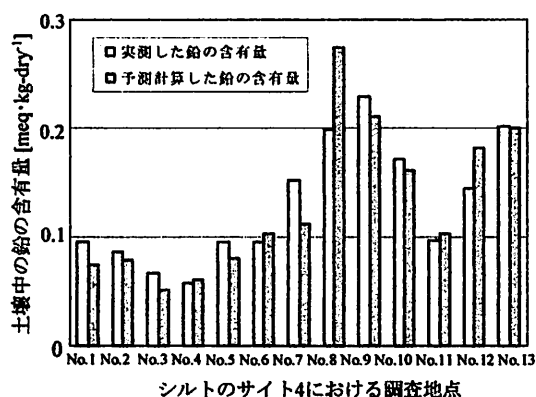


図-9 シルトにおける鉛の含有量の実測値と予測計算値

以上より、汚染土壌からの鉛の溶出量は土壌pHに大きく依存するため、土壌pHの測定が極めて重要であることがわかり、また、pHが酸性の土壌では、鉛の溶出量試験の結果を土壌pHの影響を考慮した(3)式で整理することにより、溶出量と含有量の関係がある程度までは定量的に把握できる可能性が見出せた。

4. まとめ

本研究では、過去の履歴調査等から鉛による土壌汚染が懸念された実際の4サイトの計39ポイントにおいて土壌を採取し、溶出量試験および含有量試験を合わせて実施し、鉛の溶出量と含有量が土壌の種類や土壌pHによってどのように変化するかを調べ、以下の結論を得た。

- 1) 汚染が懸念される同一サイト内においても、複数の調査ポイントを設定した際には、土壌pHに最大2.6の差が存在する場合あることがわかり、溶出量および含有

量試験とともに、土壌pHの調査が不可欠であることが明らかになった。

- 2) 溶出量試験の結果を土壌pHごとに整理することで、含有量が多い土壌では溶出量も大きくなる定量的な相関が認められた。
- 3) 土壌pHが中性あるいは酸性の鉛汚染土壌が多いサイトについて、溶出量試験および含有量試験を同時に実施したところ、含有量基準に比べて溶出量基準を超過するケースが多いことから、このようなサイトについては、複数の調査ポイントで溶出量試験を行うことが効果的な汚染対策を実施するための詳しい情報の入手に役立つと考えられた。
- 4) 汚染土壌からの脱離平衡時における等温式は、pH影響を考慮した既報の吸着側での等温式とほぼ一致し、溶出試験時の脱離平衡関係は吸着平衡時と同じパラメータを用いて定量的に整理できることがわかった。
- 5) 溶出量試験あるいは含有量試験の結果を用いて予測される含有量あるいは溶出量は、それらの実測値と概ね一致し、溶出量は、土壌pHに大きく依存することがわかった。

以上の結果から、脱離平衡時のpH影響を考慮することにより、鉛の溶出量と含有量試験の結果を定量的に整理することができ、効率的な汚染対策方法を実施するための基本情報を得ることができた。

5. 参考文献

- 1) 酒井伸一、水谷聡、高月紘、岸田拓郎：廃棄物の溶出試験に関する研究。廃棄物学会誌、Vol. 6, No.6, pp. 225-234, 1995。
- 2) 村上道夫、中島典之、古米弘明、加藤勇治：東京都内の道路粉塵中重金類の溶出特性。水環境学会誌、Vol. 29, No.11, pp. 731-735, 2006。
- 3) (社)土壌環境センター 技術委員会 リスク評価適用性検討部会：実務者のための「土壌汚染リスク評価」入門、化学工業日報社、pp. 49-151, 2008。
- 4) Sebastian S., William H. and Herbert E. A.: Solid-Solution Partitioning of Metals in Contaminated Soils: Dependence on pH, Total Metal Burden, and Organic Matter, *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 34, No.7, pp. 1125-1131, 2000。
- 5) 社団法人土壌環境センター：土壌汚染対策法に基づく調査及び措置の技術的手法の解説, 2003。
- 6) Yong, Mohamed and Wakenin (福江正治、加藤義久、小松田精吉訳)：地盤と地下水汚染の原理、pp.207-211, 東海大学出版会, 1995。
- 7) James A. F.: Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions, *National Association of Corrosion Engineers*, pp.516-523, 1974。
- 8) 尾崎哲二、渡秀雄：地盤環境の変化にともなう砒素等の溶出および酸性水発生の事例について、土壌環境センター技術二

- ユース, No.5, pp1-7, 2002.
- 9) 服部修一, 太田岳洋, 木谷日出男: 酸性水発生に関わる掘削残土の応用地質学的検討—鉾山に隣接して施工される八甲田トンネルにおける岩石特性評価法—, 応用地質, Vol.43, No.6, pp.359-371, 2003.
 - 10) 亀屋隆志, 大橋優子, 小林剛, 浦野紘平: 土壌汚染予測のための広濃度範囲での共存物影響を考慮した金属カチオン交換等温線, 土木学会論文集, Vol. VII-33, No.776, pp. 29-37, 2004.
 - 11) 環境省水・大気環境局: 平成 17 年度 土壌汚染対策法の施行状況及び土壌汚染調査・対策事例等に関する調査結果, 2007.
 - 12) 社団法人地盤工学会: 土質試験の方法と解説, pp.186-199, 1997.
 - 13) 環境省: 環境省告示第 19 号, 土壌含有量調査に係る測定方法を定める件, 2003.
 - 14) 環境庁: 環境庁告示第 46 号, 土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件, 1991.
 - 15) 土壌環境分析法編集委員会 (1994) 土壌環境分析法, 博友社, pp.195-197.
 - 16) 環境省: 環境省告示第 18 号, 土壌溶出量調査に係る測定方法を定める件, 2003.
 - 17) Anghinoni I, Baligar V.C. and Wright R.J.: Phosphorus sorption isotherm characteristics and availability parameters of appalachian acidic soils, *Commun. Soil Sci., Plant Anal.*, Vol. 27, pp. 2033-2048, 1996.
 - 18) Atanassova I. and Okazaki M.: Adsorption-desorption characteristics of high levels of copper in soil clay fractions, *Water, Air, and Soil Pollut.*, Vol. 98, pp. 213-228, 1997.
 - 19) Atanassova I.: Competitive effect of copper, zinc, cadmium and nickel on ion adsorption and desorption by soil clays, *Water, Air, and Soil Pollut.*, Vol. 113, pp. 115-125, 1999.
 - 20) Chen C.T., Lee D.Y. and Hwang K.H.: Competitive adsorption of Cd, Cu, and Pb by acid soils, *J. Chin. Agric. Chem. Soc.*, Vol. 30, pp. 83-99, 1992.
 - 21) Hwang K. H. and Lee D.Y.: Comparisons of linear and nonlinear langmuir and freundlich curve-fit in the study of Cu, Cd, and Pb adsorption on Taiwan soils, *Soil Sci.*, Vol. 163, pp.115-121, 1998.
 - 22) Jarvis S.C. and Jones L.H.P.: The contents and sorption of cadmium in some agricultural soils of England and Wales, *Soil Sci.*, Vol. 31, pp. 469-479, 1980.
 - 23) Miragaya J.G. and Page A.L.: Sorption of trace quantities of cadmium by soils with different chemical and mineralogical composition, *Water, Air, and Soil Pollut.*, Vol. 9, pp. 289-299, 1978.
 - 24) O'Connor G.A., O'Connor C. and Cline G.R.: Sorption of cadmium by calcareous soils, Influence of solution composition, *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 48, pp. 1244-1247, 1984.
 - 25) Ramachandran V. D., and Souza T.J.: Adsorption of cadmium by Indian soils, *Water, Air, and Soil Pollut.*, Vol. 111, pp. 225-234, 1999.
 - 26) Taylor R.W., Hassan K., Mehadi A. and Shuford J.W.: Zinc sorption by some Alabama soils, *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, Vol. 26, 993-1008, 1995.
 - 27) Tsadilas C.D., Semaras V. and Dimoyiannis D. (1996) Phosphate sorption by red mediterranean soils from Greece. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 27, 2279-2293.
 - 28) Kinniburgh D.G., W.H. van Riemsdijk, Koopel L.K., Borkovec M., Benedetti M.F. and Avena M.J.: Ion binding to natural organic matter: competition, heterogeneity, stoichiometry and thermodynamic consistency, *Colloids and Surf. A*, Vol. 151, pp. 147-166, 1999.
 - 29) Harter R.D.: Curve-fit errors in Langmuir Adsorption Maxima, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 48, pp. 749-752, 1984.
 - 30) Singh B. and Sekhon G.S.: Adsorption, desorption and solubility relationships of lead and cadmium in some alkaline soils, *Soil Sci.*, Vol. 28, pp. 271-275, 1977.
 - 31) Udo E.J., Bohn H.L. and Tinker T.C.: Zinc adsorption by calcareous soils, *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, Vol. 34, pp. 405-407, 1970

(2008.5.22 受付)

Relation of Content and Elution Amount of Contamination Lead in Soil and its pH Dependence

Takashi KAMEYA¹, Yuko OHASHI^{1, 2}, and Takeshi KOBAYASHI¹

¹Faculty of Environment and Information Sciences, Yokohama National University

²Geotechnical Center, Chubu Branch, OYO corporation

The elution tests and the content tests of the lead contaminated soils, those were collected from 39 points of 4 sites where soil contamination had been doubted, were investigated. The soil pH was different from 1.4 times to 2.6 times in the same site. A significant correlation was observed between lead content and elution of each soil in every pH. The relation between lead content and elution amount in elution test could be approximated quantitatively by using a desorption isotherm which was considering pH influence. Therefore, it was confirmed that soil pH was very important to understand soil contamination precisely. These results are useful to improve conventional investigation of soil pollution to be more effective.