

廃棄物を活用した建設発生土の自然由来重金属類に対する環境調和型 不溶化処理技術の開発

Development of environmentally sound and sustainable immobilization treatment for naturally derived harmful heavy metals in surplus soils using waste materials

産業技術総合研究所 地質調査総合センター 地圏資源環境研究部門
主任研究員 斎藤 健志

（研究計画ないし研究手法の概略）

トンネルや道路などの土木工事に由来する建設発生土には、自然由来の重金属類（例、As：ヒ素、Cd：カドミウム、Pb：鉛）が溶出しやすい化学形態で高濃度に含まれていることがしばしばあり、近年、問題となるケースの報告が増えている。その対策としては、コストなど種々の理由から、原位置での処理が推奨されており、例えば、その技術の一つである重金属類を固定化する吸着処理を含む、不溶化処理技術が注目されている。その一方で、人間活動の増大に伴い、廃棄物の排出量が爆発的に増加しており、最終処分場の残余年数の確保や循環型社会の構築、さらには、SDGsの実現などに向けて、廃棄物の有効活用も強く求められている。

本研究では、自然由来の重金属類を高濃度に含む建設発生土に対して、複数の廃棄物やそれらをベースにした再生資材を用い、環境調和型の不溶化処理技術を開発するための基礎的な検討を実施した。ここでは、廃棄物や再生資材である、鉄鋼スラグ、フライアッシュ、リサイクルコンクリート、軽量気泡コンクリートを活用した。これらの資材は、比較的どこでも入手可能な資材であることから、世界中どの地域でも適用可能な汎用的技術となる可能性が期待され、その社会的な意義は高い。

研究方法としては、はじめに、建設発生土を模擬した試料として、計12種類の自然由来重金属類を含むと予想される土壤試料（土壤A～Lとする）を採取した。その土壤に対して、環境省告示第46号に基づく、溶出試験を実施した。具体的な手順としては、風乾した土壤を2mmのふるいにかけて、土壤と水を重量体積比10%の割合で混合し、20℃で6時間振とうした。振とう回数は、毎分約200回である。その後、10分～30分ほど静置し、3,000重力加速度で20分間遠心分離した。そこから得られた上澄み液に対して、0.45 μmのメンブレンフィルターでろ過をし、ICP-MS（誘導結合プラズマ質量分析計：Agilent 7700x ICP-MS）で重金属類（B：ホウ素、Cr：クロム、Ni：ニッケル、Cu：銅、Zn：亜鉛、As、Se：セレン、Cd、Pb）を定量した。定量化したデータについては、土壤環境基準（土壤の汚染に係る環境基準）の数値を目安に、それを超過している特徴的な土壤を2種類選定し（その詳細は後述する）、以下の不溶化試験に供した。なお、各土壤においては、それぞれ3回の繰り返し試験を実施している。

不溶化試験の手順としては、各土壤に対して0%、2.5%、5%、10%の比率で廃棄物ならびに再生資材を添加し、24時間、20℃および相対湿度60%の環境下において、養生を行った。その後、その試料に対して、上記の環境省告示第46号に基づく、溶出試験を実施した。最終的には、土壤への廃棄物および再生資材を添加していない試料（添加率0%）を基準として、

添加率の違いによる重金属類溶出量への影響（効果）を評価し、相対的に不溶化性能が高い資材を検討した。なお、各試料においては、それぞれ少なくとも3回の繰り返し試験を実施している。

（実験調査によって得られた新しい知見）

○不溶化試験に供する土壌の選定

図1に、土壌環境基準に規定されている重金属類のうち、複数の土壌で基準値を超過している結果が得られたAs、Cd、Pbについて、それぞれの基準値に対する相対値を示す。ここで、仮に相対値が1を示せば、基準値と同等の数値が得られたことを表している。なお、土壌環境基準が設定されている重金属類とその具体的な数値については、B: 1,000 µg/L、Cr: Cr(VI)として50 µg/L、As: 10 µg/L、Se: 10 µg/L、Cd: 3 µg/L、Pb: 10 µg/Lの通りである。本研究で対象とした12種類の土壌では、B、Cr、Seについて、基準値を超過した土壌は認められなかった。

はじめに、Asに着目すると、基準値を超過した土壌は5種類であり、最も基準を超過していた土壌では、土壌環境基準値の10倍以上を超える値を示した。また、Cdについては、基本的には、ほとんど溶出が認められなかったが、1つの土壌においてのみ、土壌環境基準値の5倍を超える数値が確認された。Pbは、Asと同様に、複数の土壌で基準超過が認められ、それは4種類の土壌であった。最も基準を超過していた土壌では、土壌環境基準値の200倍以上と、極めて高い基準超過が確認された。

以上の結果を受けて、Pbの極めて高い基準超過が認められた土壌E(Asも超過)、そして、Cdの基準超過が確認された土壌K(AsならびにPbも超過)について、以下、廃棄物および再生資材を活用した不溶化試験に供した。

○廃棄物ならびに再生資材を活用した不溶化試験

不溶化試験では、土壌EについてはPbとAs、土壌KにおいてはCd、As、Pbを、それぞれ対象とした。これらの土壌に対して、廃棄物ならびに再生資材（鉄鋼スラグ、フライアッシュ、リサイクルコンクリート、軽量気泡コンクリート）を異なる添加率（0%、2.5%、5%、10%）でそれぞれ加え、添加率の違いによる重金属類（As、Pb、Cd）溶出量への影響（効果）を評価した。

図2と図3には、一例として、リサイクルコンクリートならびに軽量気泡コンクリートによる、土壌Eおよび土壌Kの不溶化試験結果を、それぞれ示す。前者、リサイクルコンクリートでは、その土壌への添加率が上昇するにつれて、それぞれの重金属類溶出量が明瞭に低下していく傾向が確認された。その一方で、後者の軽量気泡コンクリートについては、基本的にリサイクルコンクリートと類似する傾向が見られたが、土壌KのCdにおいてのみ、その傾向は異なるものであった。具体的には、添加率2.5%の条件で溶出量の増加が認められ、その後、再び溶出量が低下する傾向が確認された。この現象については、フライアッシュを土壌Kに添加した際のCdに対しても、同様であった（図4）。なお、鉄鋼スラグについては、添加率が上昇するのに伴い、Cdの溶出量が顕著に低下し、その添加率が2.5%の条件においても、Cdが全く溶出しない、すなわち、不溶化されていると考えられる結果が得られた（図4）。

表1および表2には、添加率を増やしていった場合に、溶出量が増加しなかった廃棄物と

再生資材を除く、すなわち、添加率の上昇に伴う重金属類溶出量の単調減少が認められた廃棄物と再生資材に対して、不溶化率(%)の最大値ならびにそのときの添加率(%)を一覧で示す。

図2でも示したが、リサイクルコンクリートについては、いずれの土壌、そして、対象とした全ての重金属類に対しても、溶出量が単調減少する傾向が得られた。特に、Pbの不溶化率は80%以上、そして、Cdのそれは100%と、高かった。軽量気泡コンクリートについても、Cdを除く重金属類に対しては、一定の不溶化効果が認められた。具体的には、Asについては、リサイクルコンクリートと同程度の効果が得られたが、Pbに対してそれと同等の不溶化効果を発現させるためには、より多い添加率が必要であった(表1ならびに表2)。一方、Cdの不溶化効果のみに着目すると、鉄鋼スラグが最も低い添加率(2.5%)において、100%の効果を発揮した(図4および表2)。

以上より、本研究で対象とした土壌、そして、重金属類に対しては、活用した廃棄物と再生資材の中では、最もリサイクルコンクリートが万能に不溶化効果を発揮できることが明らかになった。今後、実務に応用するに当たっては、得られた不溶化効果に関わるメカニズムの解明、そして、長期的に安定して不溶化されているのかどうかなど、より詳細な評価が不可欠である。

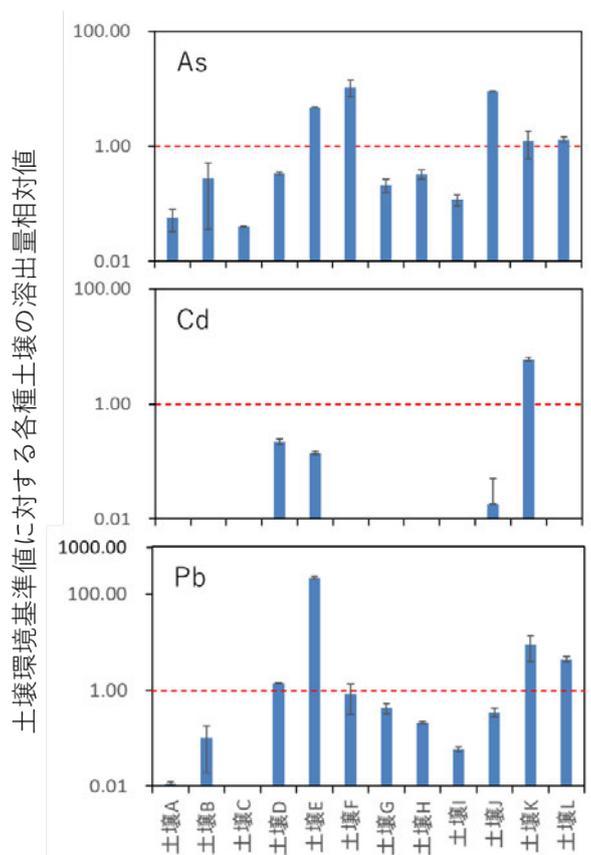


図1 As、Cd、Pbの土壌環境基準値に対する各種土壌の溶出量相対値 (エラーバーは、3回の繰り返し試験における標準偏差を示している。赤線は基準値であり、棒グラフが表れていない土壌は、相対値0.01以下であることを意味している。)

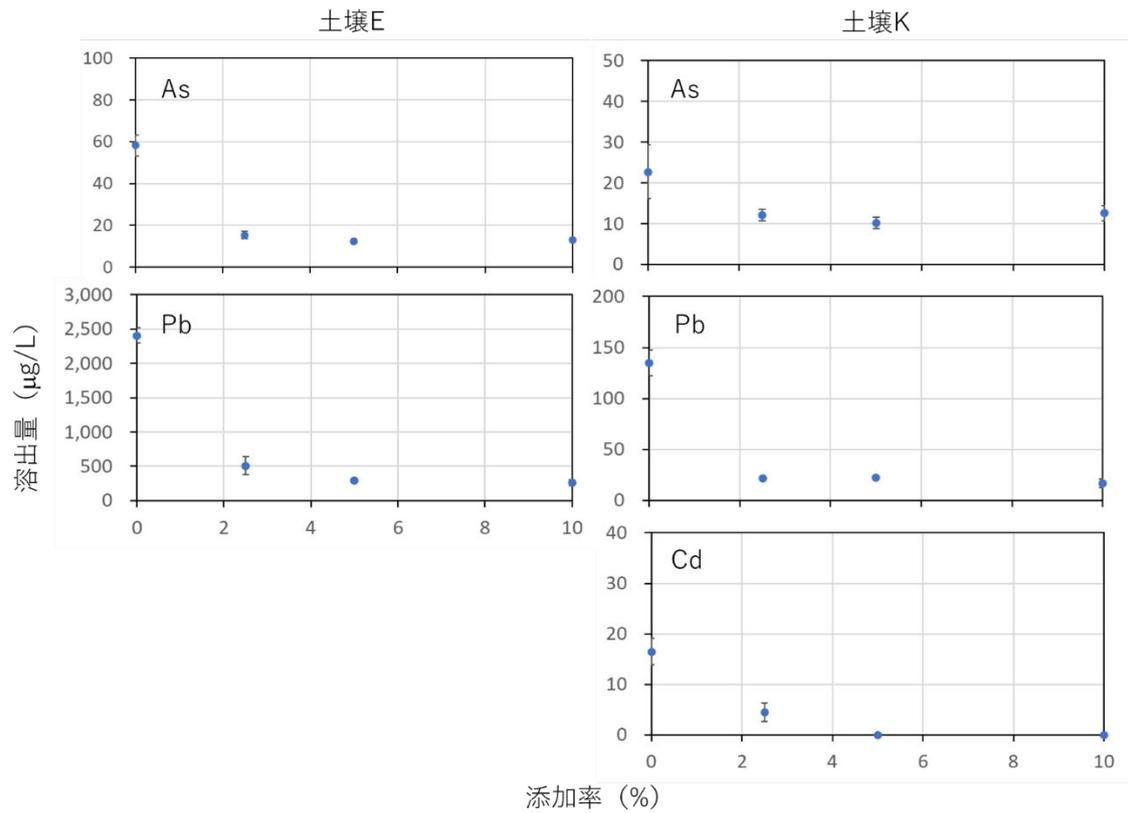


図 2 リサイクルコンクリートの添加率 (%) と重金属類溶出量 (μg/L) の関係 (エラーバーは、3 回以上の繰り返し試験における標準偏差を示している)

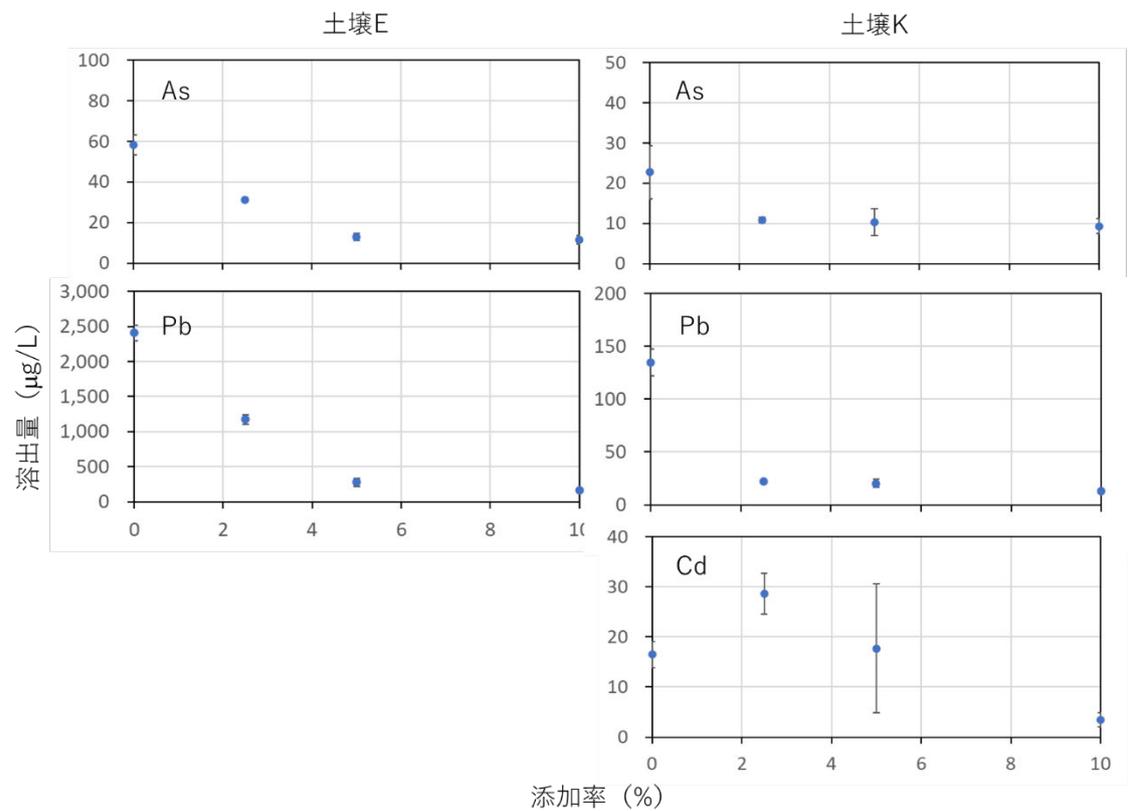


図 3 軽量気泡コンクリートの添加率 (%) と重金属類溶出量 (μg/L) の関係 (エラーバーは、3 回以上の繰り返し試験における標準偏差を示している)

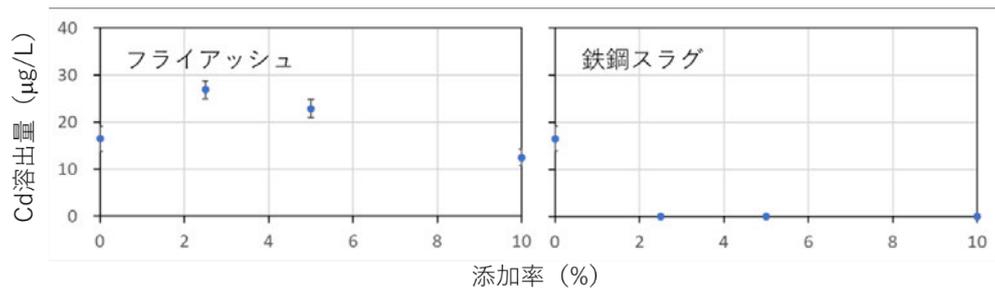


図 4 フライアッシュおよび鉄鋼スラグの添加率 (%) と Cd 溶出量 (µg/L) の関係
(エラーバーは、3 回以上の繰り返し試験における標準偏差を示している)

表 1 土壌 E における不溶化率 (%) の最大値ならびにそのときの添加率 (%)
(— : 添加率の上昇に伴う溶出量の単調減少が認められなかったため除外したデータ)

土壌 E	As		Pb	
	添加率 (%)	不溶化率 (%)	添加率 (%)	不溶化率 (%)
鉄鋼スラグ	—	—	—	—
フライアッシュ	—	—	—	—
リサイクルコンクリート	5	78.9	5	87.8
軽量気泡コンクリート	5	77.8	10	86.0

表 2 土壌 K における不溶化率 (%) の最大値ならびにそのときの添加率 (%)
(— : 添加率の上昇に伴う溶出量の単調減少が認められなかったため除外したデータ)

土壌 K	As		Pb		Cd	
	添加率 (%)	不溶化率 (%)	添加率 (%)	不溶化率 (%)	添加率 (%)	不溶化率 (%)
鉄鋼スラグ	—	—	—	—	2.5	100
フライアッシュ	5	66.0	5	89.4	—	—
リサイクルコンクリート	2.5	46.9	2.5	83.8	5	100
軽量気泡コンクリート	2.5	52.2	10	90.6	—	—

(発 表 論 文)

- 1) Nagasinghe, I. U., Saito, T., Takemura, T., Kawamoto, K., Komatsu, T., Watanabe, N., and Kawabe, Y. Applicability of alkaline waste and by-products as low cost neutralizers for acidic soils. 国際誌投稿中.