

鉄道一般

車両

軌道

構造物

防災

電力

信号通信  
情報

材料

環境

人間科学

浮上式鉄道

# 自然地盤中の重金属による環境への影響を評価する

地盤中には工場などから人為的に排出された有害物質ではなく、重金属が天然に含まれていることがあります。改正土壤汚染対策法では、このような自然的原因で地盤に含まれている重金属も対象となりました。そのため、掘削工事の建設発生土は、直接法の対象ではありませんが、重金属を含む場合には適切に処理をすることが求められています。そこで、地盤中に自然に含まれる重金属の環境への影響を適切に評価する必要が生じています。

## 地盤中の重金属と環境汚染

地盤中の重金属による環境汚染として最も知られているのは、鉱山周辺での鉱害問題でしょう。鉱山周辺には熱水（高温の地下水）の活動により、銅、鉛、亜鉛などの重金属を含む硫化鉱物（☞参照）が多く分布しています（図1）。鉱山ではこれを採掘していますが、この時に発生する坑道からの湧水や残土処分地からの浸出水は強酸性で重金属を多く含むため、それらが流入する河川水などの水質の悪化が社会問題となっていました。例えば、足尾銅山の鉱毒問題、神通川のイタイイタイ病、土呂久鉱山のヒ素問題などが有名です。また近年は、土木工事でも周辺環境への影響が問題とされ、掘削工事の建

設発生土からの酸性水や重金属の溶出が問題となった事例も報告されています。鉱山周辺では硫化鉱物が濃集している箇所があるため、土木工事の際に鉱山と同様な環境問題が起こることがありますが、都市部でも同じような問題が生じることがあります。

東京や大阪など都市部の自然地盤の地質は、一般に海中で堆積した堆積物からなります。これらは堆積時に海水を取り込みますが、海水には様々な重金属と硫酸が含まれ、続成作用（☞参照）の間に重金属を含んだ硫化鉱物が堆積物中に生成されます。このため、都市部の地質にも重金属が含まれることがあるのです。

このような地盤中の重金属による環境汚染の問題は、地盤に含まれる黄鉄



太田 岳洋  
Takehiro Ohta

防災技術研究部  
地質研究室  
室長

【専門分野】 応用地質学、  
応用地球化学、トンネル・斜面の地質評価



石原 朋和  
Tomokazu Ishihara

防災技術研究部  
地質研究室  
研究員

【専門分野】 応用地質学、  
土质地質

### ☞ 硫化鉱物

金属元素が硫黄と結合している鉱物を硫化鉱物といいます。主な硫化鉱物としては、黄鉄鉱（FeS<sub>2</sub>）、閃亜鉛鉱（ZnS）、方鉛鉱（PbS）、辰砂（HgS）などがあります。硫黄の一部がヒ素（As）やセレン（Se）などに置き換わった硫化鉱物もあります。日本の多くの鉱山では硫化鉱物を採掘し製錬していました。

### ☞ 続成作用

堆積したばかりの柔らかな堆積物が圧密とセメント化によって硬い岩石になっていく過程をいいます。上からの荷重により、堆積物中の隙間がなくなり粒子同士がくっついて押し固められる作用と堆積物中の隙間を通る地下水から炭酸カルシウムなどが沈殿して隙間が埋められる作用があります。

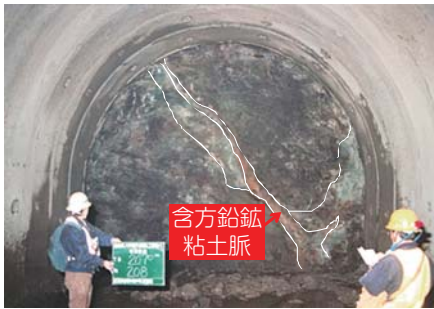


図1 硫化鉍物の濃集部(鉍脈)

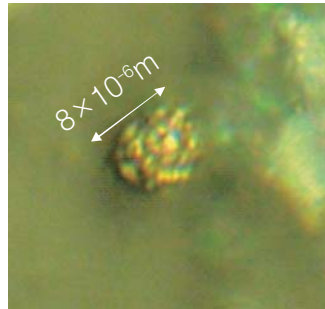


図2 地盤中の黄鉄鉍

鉍(図2)などの硫化鉍物が酸素を含んだ降水や地下水と接触し、酸化・分解することが原因と考えられています。

### 土壌汚染対策法と建設発生土

平成15年2月に施行された「土壌汚染対策法(以下、旧法)」は人為的な土壌の汚染を対象とし、建設発生土のような自然的な原因に由来する重金属は対象外とされていました。しかし、平成22年4月に施行された「改正土壌汚染対策法(以下、改正法)」では、自然的原因で有害物質を含む土壌も法の対象となりました。

しかし、法に定める土壌汚染調査での溶出量試験(公定法)(※参照)では、「破碎することなく、自然状態において2ミリメートル目のふるいを通過させて得た土壌」が対象とされ、また調査は「当該位置から深さ50センチメートルまでの土壌が地表から深さ10メートル以内にある場合に限る」とされています。そのため、トンネルを掘削した場合に排出される発生土の取り扱いについては明確ではなく、発生土自体は改正法においてもその対象

#### ※ 溶出量試験(公定法)

公定法とは分析化学などの分野で成分分析を行う際、国際機関や国家などにより指定された方法のことをいいます。土壌汚染調査の溶出量試験は、平成15年3月環境省告示第18号に定められています。

外であると認識される場合が多いようです。しかしながら、重金属を含んだ発生土を埋め立てた場所を再開発する際には法の対象となりうることや工事箇所周辺の環境の保全がより強く求められることから、多くのトンネル工事現場では、鉍山周辺だけではなく、都市部などの地盤を対象とした工事でも発生土の処分に細心の注意を払うようになりました。

### 掘削工事での重金属の評価事例

東北新幹線八甲田トンネルは、旧法の施行前に着工されたため、公定法ではなく、独自の重金属の溶出に関する岩石の判定手法(図3)により、対策が必要と評価された発生土を「管理型」、必要がない発生土を「一般型」と区分しました<sup>1)</sup>。本事例では、肉眼鑑定、溶出試験、全岩化学組成分析など複数の試験結果から総合的に評価しています。また、判定は日々のトンネル工事の工程への影響をできる限り少なくするため、判定までの所要時間を24時間以内としている点も大きな特徴です。

旧法施行以降のトンネル工事では、公定法により重金属の溶出性を評価している事例が多くみられます。前述のように公定法の対象は2mmふるい通過分の土壌ですが、建設発生土の大部分は2mmより大きいので、2mm以下に粉砕して試験に供している事例がほとんどです。しかし、粉砕すること

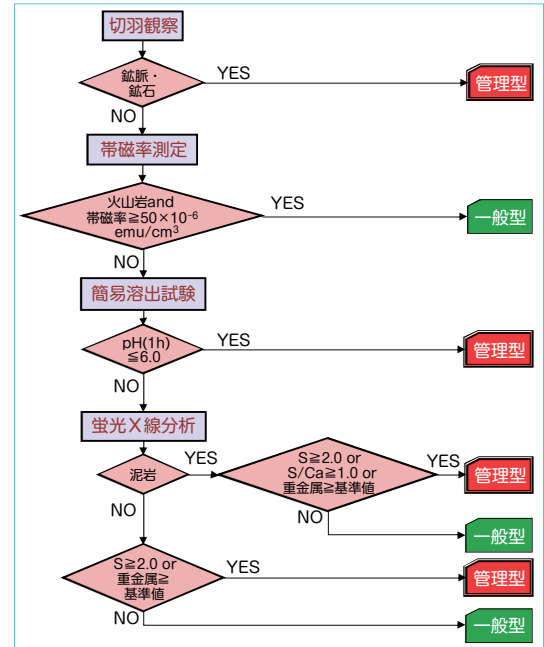


図3 八甲田トンネルでの判定手順<sup>1)</sup>

により、実際の発生土に比べて比表面積が大きくなり、また結晶構造の歪みが生じて反応性が高くなるため、過剰な評価となることが指摘されています。また、公定法では6時間攪拌することが必要であり、重金属の分析にも時間を要するため、施工中に逐次評価する手法としては適していません。

そのため、公定法だけではなく他の試験による評価を併用している事例が見られます。例えば仙台地下鉄では、2mm以下に粉砕した試料を用いた公定法に準拠した溶出試験で短期溶出特性を評価し、過酸化水素水を用いた促進溶出試験により長期溶出特性を評価しています<sup>2)</sup>。

公定法は結果が得られるまでに時間を要するため、多くの場合に事前調査で実施されています。また、施工中では先進ボーリングで採取されたコア試料を用いて実施し、掘削前に評価する事例が多くみられます。

### 新しい評価方法の検討

公定法のような溶出試験には、前述の実際との粒径の相違、過大な反応性などの問題のほかに、処分地における

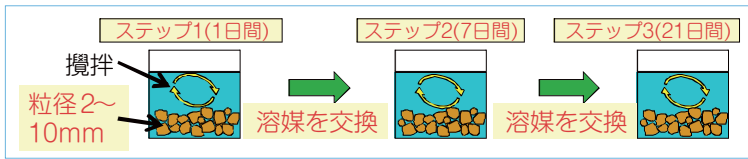


図4 ステップバッチ試験の概要

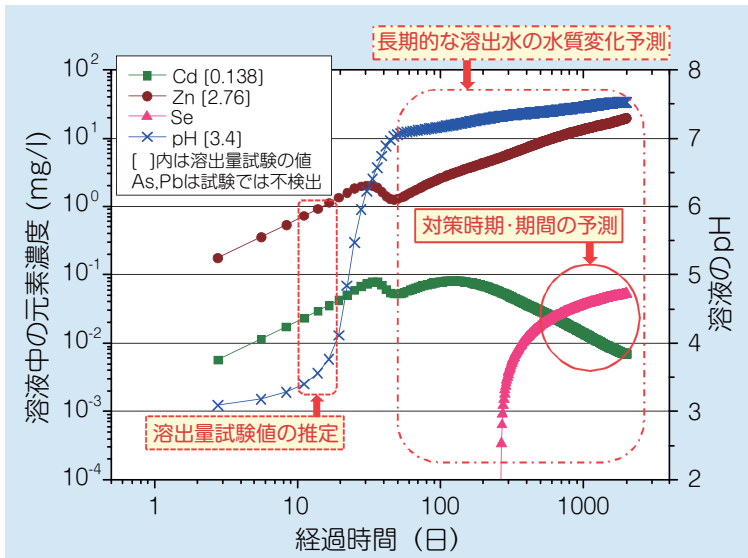


図7 溶出シミュレーション結果の例

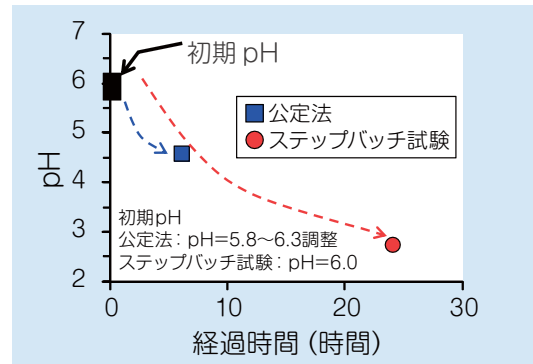


図5 ステップバッチ試験と公定法の比較

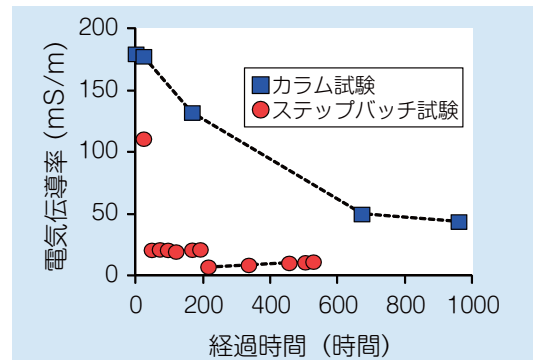


図6 ステップバッチ試験とカラム試験の比較

地下水流動の影響や長期的な溶出特性が評価できないといった問題もあります。そこで、多くの研究機関が様々な試験・評価方法を検討しています<sup>3)</sup>。

### 溶出特性の評価

ここでは、鉄道総研が検討した短期的および長期的な溶出特性をともに評価する方法を紹介します。

#### ステップバッチ試験

ステップバッチ試験は、容器の中に試料と溶媒を入れ反応させるバッチ式溶出試験に数段階のステップを設け、ステップごとに新しい溶媒(水)に交換する方法です(図4)<sup>4)</sup>。溶媒の交換により、処分地内での地下水流動による重金属の移動を模擬しています。試料の粒径は任意ですが、発生土の実状を考慮し、2~10mmの粒径の試料で試験を行うことを提案しています。

最初のステップの試験結果と公定法による結果を比較するとほぼ同様の傾向を示します(図5)。したがって、この試験でも公定法と同様の評価を行うことができます。また、水の流動と長

期的な水質変化を検討するために、筒状の容器に試料をつめてその中を常時通水させるカラム式溶出試験が行われることがあります。ステップバッチ試験とカラム式試験における水質変化を比較するとどちらも電気伝導率が減少します(図6)ので、ステップバッチ試験でも地下水流動の影響や長期的な溶出傾向を評価できます。

#### 溶出シミュレーション

公定法のようなバッチ式溶出試験における水質の時間変化をシミュレーションする手法を確立しました<sup>5)</sup>。このシミュレーションでは鉱物の溶解を熱力学に基づいてモデル化しています。

このシミュレーションによると、バッチ式溶出試験でも水質は刻々と変化し、試験で得られる結果はある経過時間での水質を表していることがわかります(図7)。また、短時間で溶出する重金属と長時間経過後に溶出する重金属があることがわかり、経過時間により対策の対象となる重金属が変わることがわかります(図7)。

### 周辺環境への影響評価

これまで、建設発生土の処分地からの重金属の拡散を定量的に評価した施工事例はありません。土木研究所はサイト概念モデルに基づき、周辺地下水などへの影響を浸透流解析により評価する手法を提案しています<sup>3)</sup>。この時、処分地からの重金属の溶出量を公定法の結果から推定する手法が示されています。

鉄道総研では、移流拡散解析に前述の溶出シミュレーションを取り入れ、処分地内および周辺土壌での鉱物の溶解による重金属の溶出とこれらの粘土鉱物などへの吸着を考慮した移流拡散解析による影響評価手法について検討しています。この手法により、処分地内での重金属濃度の時間変化や周辺土壌での重金属の濃度分布や拡散程度を見積もることができます(図8)。

### 地盤中の重金属への対応の流れ

これまでの経緯や改正法への対応、新たな評価手法の動向をみると、トン

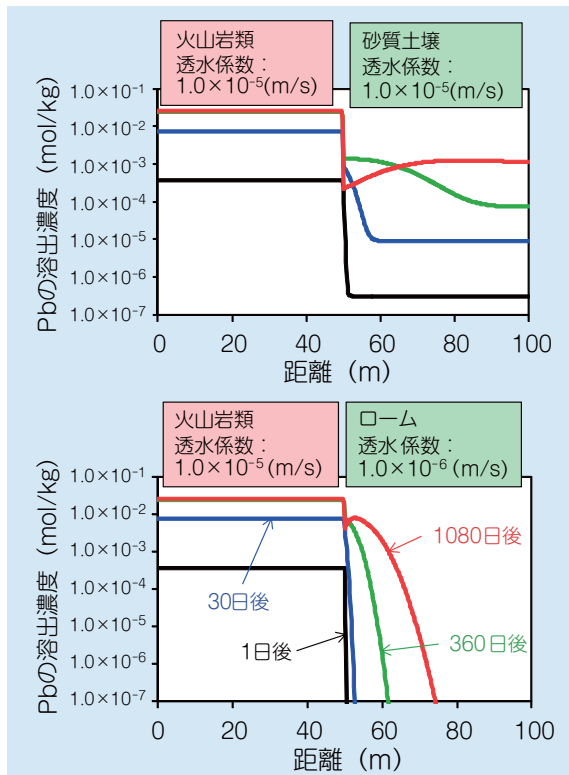


図8 処分地から周辺土壌への重金属拡散シミュレーション

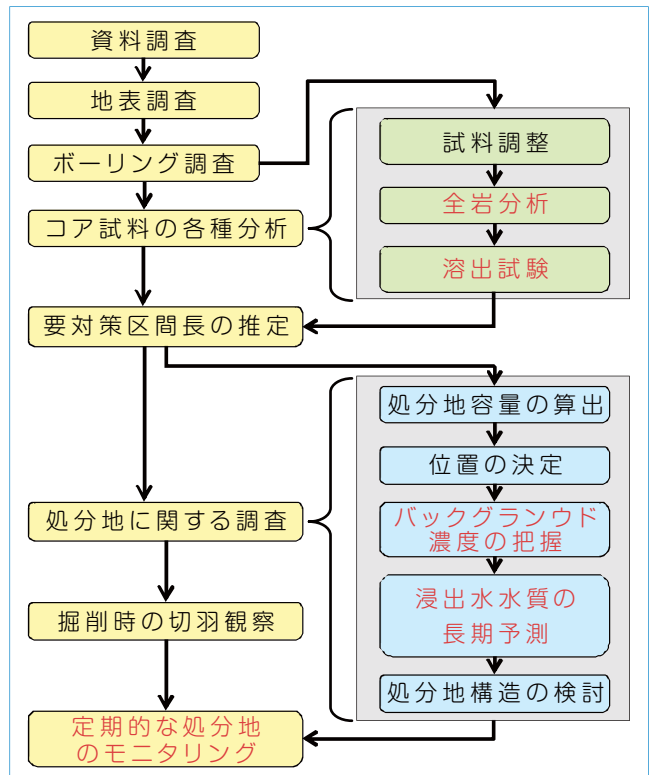


図9 自然地盤の重金属への対応フロー

ネル工事における地盤中の重金属への対応は、図9に示すような流れ<sup>6)</sup>で行うことが望ましいと考えます。

まず、事前調査として以下の調査を行います。①資料調査：鉱山跡などの分布を把握します。②地表調査：重金属濃集箇所を把握し、ボーリング計画を立案します。③ボーリング調査：地質状況を把握し、コア試料を採取します。④コア試料分析：全岩分析により重金属含有量、溶出試験により溶出特性を把握します。溶出試験に際しては、全岩分析で含有が確認された重金属について試験を行うことが望ましいと考えられます。⑤要対策区間長の推定：要対策区間を推定します。⑥処分地に関する調査：処分容量の算出と最適位置の決定を行い、予定地周辺の河川水・地下水・地盤・水利用状況の現状把握し上で、構造を検討します。

施工中には以下のような調査を実施します。⑦掘削時の切羽観察：地質状況を確認します。⑧定期的な処分地のモニタリング：浸出水水質の経時的変

化を確認します。モニタリングは、施工終了後もある程度の期間は継続することが重要です。

### あとがき

地盤中の重金属の溶出評価への公定法の適用についての科学的根拠や長期的な溶出リスクの評価法、周辺環境へのリスク評価法などが確立されていないため、今後これらの課題に取り組む必要があります。また、今回示した調査・評価方法や対応方法では、建設発生土の処分地周辺の元来の状況と発生土からの浸出水の関係、およびそれに対応した対策、モニタリング手法を関係機関などに理解してもらうためのリスクコミュニケーションが重要となります。このリスクコミュニケーション手法の確立も今後の重要な課題です。

なお、ここで紹介した成果の一部は、環境研究総合推進費の助成を受け実施しました。RRR

### 文献

- 1) 太田岳洋, 他: 掘削残土からの酸性水溶出に関する岩石特性評価, 鉄道総研報告, Vol.18, No.9, pp.59-64, 2004.9
- 2) 門間聖子, 他: 仙台市内に分布する竜の口層の岩石の重金属溶出特性について, 日本応用地質学会平成20年度研究発表会講演論文集, pp.75-76, 2008.10
- 3) 土木研究所: 建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壌への対応マニュアル(算定版)(案), 土木研究所資料第4156号, 2010.10
- 4) 石原朋和, 他: ステップバッチ試験による岩石溶出特性に関する検討, 日本応用地質学会平成23年度研究発表会講演論文集, pp.165-166, 2011.10
- 5) 太田岳洋, 他: 熱力学シミュレーションから見た溶出量試験, 日本応用地質学会平成23年度研究発表会講演論文集, pp.85-86, 2011.10
- 6) 服部修一, 太田岳洋: 重金属などを含む掘削残土の分別処理方法, トンネルと地下, Vol.39, No.10, pp.747-757, 2008.10