

# 土壤汚染対策技術の現状と実例

## 7. 自然由来の重金属汚染問題と実例

太田 岳 洋 (おおた たけひろ)

鉄道総合技術研究所防災技術研究部 地質研究室長

### 7.1 はじめに

土壤汚染対策法の施行以来、人為的な原因による汚染だけでなく、自然的原因により土壌や岩石に含まれている有害物質、主に砒素や重金属類が問題視される場面が見られるようになった。このような問題を背景に本章では、第2節「自然由来重金属「汚染」とその原因」において、自然的な原因で含有される有害物質の環境への影響のメカニズムについて理学的な観点から解説する。第3節「建設工事での自然由来重金属の対策事例」で最近その処理対象が多量であるために問題が大きかつ複雑になる掘削工事での対応について、東北新幹線八甲田トンネルと仙台地下鉄東西線の事例を概説し、それらから明らかとなった問題点を整理する。そして、第4節「今後の自然由来重金属対策の考え方」では、国土交通省から出された「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（暫定版）（案）」などに基づいて、自然由来の重金属「汚染」に対する今後の調査法のあり方や溶出現象や環境影響などの評価の考え方について述べる。

### 7.2 自然由来重金属「汚染」とその原因

本節では、廃鉱や掘削工事などにおける自然由来の有害物質による環境「汚染」の事例について、その現象を理学的に解説し、それらを人為的な有害物質による汚染と同等に「汚染」と称することの是非を問う。

#### 7.2.1 自然由来重金属は「汚染」か？

日本の国土は多様な地質からなり、多数の火山や温泉などが存在するうえ、様々な変質作用を被った地質も広く分布している。このような地質では銅、鉛、亜鉛等の重金属や砒素等が含まれることが多々認められる。人類はこれらの岩石に含まれている重金属等を有用な資源として利用してきた。我が国の20世紀はこれら重金属等を産業の発展とともに利用してきた「資源の世紀」といえよう。しかしながら、この「資源の世紀」は重金属等を利用する過程で発生する様々な公害をも生み出した「公害の世紀」ともいえる。近代日本の公害史でまずあげられるのは足尾銅山の鉱害であろう<sup>1),2)</sup>。足尾銅山での被害は、製錬所から排出された煤煙中の二酸化イオウによる大気汚染や山林の立ち枯れとそれによる山地の荒廃に伴う洪水、廃滓堆積場の決壊・大量流出、鉱山施設からの重金属などを高濃度に含む鉱廃水による水質汚染

や鉱滓による土壤汚染、などである<sup>1)</sup>。そのほか、神岡鉱山の鉱廃水による神通川のカドミウム汚染（イタイイタイ病）<sup>2),3)</sup>、土呂久鉱山周辺の砒素汚染<sup>2),4)</sup>、松尾鉱山の酸性鉱廃水による北上川の汚染<sup>5),6)</sup>など多数の鉱山に由来する鉱害が発生し、現在も鉱廃水処理などの対策を多くの休廃止鉱山で行っている。これら鉱害の起源は「天然」の岩石に含まれていた重金属等であり、そういう意味では自然由来重金属「汚染」と言えるかもしれない。しかしながら、これら鉱害の発生に際しては、人間がその重金属等を求めて掘削して採算に見合う有用な部分のみを取り出し、その際に排出される煤煙、鉱廃水や採算の見込めないズリ（鉱滓）等を意図的に廃棄してきた点では、人為的な「汚染」と言えよう。当時は法規制が未整備であり、このような鉱害が顕在化した。

一方、20世紀後半から21世紀には我が国でも環境保全への関心が高まり、環境保全に関する法整備も行われてきた。前述の鉱山における煤煙、鉱廃水、鉱滓等は鉱山保安法の対象となり、その他にも大気汚染防止法、水質汚濁防止法、廃掃法のもとで対策がとられている。この潮流は汎世界的であり、それゆえに21世紀は「環境の世紀」と称される<sup>1)</sup>。日本の環境保全関連法規の中でも平成21年4月に改正案が国会で可決された「土壤汚染対策法」が平成15年2月に施行されて以来、地盤の環境に対する意識が高くなりつつある。土壤汚染対策法での汚染の有無の基準については、本講座の第2章および第3章でも詳しく述べられているが、有害物質を人間が摂取した場合のリスク評価に基づいている。そのうちの土壤溶出量基準（以下、「溶出量基準」とする）は環境基本法の地下水の水質汚濁に係る環境基準（以下、「地下水環境基準」とする）と同等である。福岡や大阪の平野部の井戸では地下水環境基準を大幅に超える濃度の砒素が検出されることがある<sup>7)~9)</sup>が、これらはその分布深度や地質から人為的に付加された砒素ではなく、地盤に天然に含有されていた砒素が自然に溶出した結果であるとされている。同様な事象は世界的にも多く、近年はバングラデシュやベトナムの事例<sup>10),11)</sup>が有名である。また、仙台市の地盤では土壤汚染対策法の溶出量基準を超える砒素やカドミウムの溶出量を示す地質が分布することが明らかになった<sup>12)</sup>。その結果、このような地質を掘削せざるをえない仙台地下鉄東西線工事では掘削ズリを多大な費用を費やして処分している<sup>13)</sup>。これらの「汚染」事象は、生活用水や交通網の確保といった人間

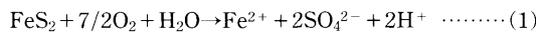
## 講座

が社会生活を営む上で必要な資本整備を行った際に、意図せず重金属等が「自然的」に存在していたのであり、重金属等の利用を目的とした鉱山開発における鉱害の発生とは異なる。

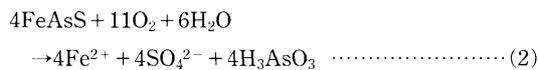
## 7.2.2 自然由来重金属による環境影響の原因

## (1) 鉱山地域における重金属等の溶出現象

前述のように鉱山における鉱害には煤煙による被害などもあるが、ここでは重金属等を含む浸出水による汚染の原因について地質学的、鉱物学的に述べる。一般に鉱山で採鉱の対象となる重金属等は岩石の中では硫化鉱物に含まれている。硫化鉱物は酸素と水に触れると酸化され、分解することが知られている。硫化鉱物のうち代表的な黄鉄鉱 ( $\text{FeS}_2$ ) は水と接触すると、式(1)に示す反応により酸化分解し、鉄イオン、硫酸イオン、水素イオンが放出される<sup>14),15)</sup>。



黄鉄鉱の鉄やイオウに換わって不純物として様々な重金属等が含有されることがあり、黄鉄鉱の分解に伴いこれらの重金属等が放出されることとなる。そのうち特に、黄鉄鉱のイオウの一部が砒素に置換された硫砒鉄鉱 ( $\text{FeAsS}$ ) は次式のように亜硫酸、硫酸イオン、鉄イオンに分解される<sup>16)</sup>。



前述の神岡鉱山では主な採掘対象であった閃亜鉛鉱 (せんあえんこう,  $\text{ZnS}$ ) が上記の黄鉄鉱や硫砒鉄鉱と同様に酸化分解した際に、一般的に亜鉛 ( $\text{Zn}$ ) を置換し不純物として閃亜鉛鉱中に含有されるカドミウム ( $\text{Cd}$ ) が鉱廃水に放出されたことが原因とされている。

このように、硫化鉱物の分解に際しては、金属元素と主に硫酸イオン ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) と水素イオン ( $\text{H}^+$ ) が放出されることになるため、鉱山の坑道からの廃水やズリ捨場からの浸出水は硫酸酸性を示し、重金属元素や砒素を含むこととなる。

## (2) 海成泥岩地域における酸性水・重金属の溶出現象

日本の第三系、第四系の堆積物において、泥質堆積物の全イオウ含有量は0.0~8.0%、平均0.59%、砂質堆積物では0.0~3.6%、平均0.21%と報告されている<sup>17)</sup>。泥岩中のイオウは主に黄鉄鉱 ( $\text{FeS}_2$ ) として存在すると考えられる。一般に、鉱化帯などで見られる黄鉄鉱は立方体の自形を呈するものが多いが、泥岩に含まれる黄鉄鉱は初生的にはフランボイダル (木苺状) 黄鉄鉱である (口絵写真—16)。このような泥岩中の黄鉄鉱も雨水や地下水との接触により式(1)に示した反応で酸化分解され、環境へ硫酸酸性の水を供給する<sup>18)</sup>。鉱山地域で見られる黄鉄鉱と同様に、泥岩中のフランボイダル黄鉄鉱も不純物として鉛 ( $\text{Pb}$ ) 等の重金属類や砒素を含むため、泥岩からの酸性溶出水中にもこれらの重金属等が含有されることがある。一方で、新鮮な泥質岩中には酸性化を緩衝する能力を有する鉱物 (斜長石や方解石) が

一般的に含まれ、岩石と接する水のpHの低下と重金属等の溶出を防止することが期待される。

## (3) 堆積物等からの砒素の溶出現象

岩石中に普遍的に含まれる微量の砒素は風化浸食により水に溶けて河川により下流へ運ばれる。通常の河川水はpHが7~8で酸化還元電位 ( $\text{Eh}$ ) > 0.5 Vの酸化的な環境にあり、この環境では砒素はヒ酸水素イオン ( $\text{HAsO}_4^{2-}$ ) として存在する。ヒ酸水素イオンは酸化環境では針鉄鉱 (水酸化鉄,  $\alpha\text{-FeOOH}$ ) や粘土鉱物の微粒子に選択的に吸着され、河川の底質中に固定される。このため、通常の河川水等では砒素が検出されることはない。しかし、砒素を吸着した水酸化鉄の沈殿物が  $\text{Eh}$  が0.5 V以下を示すような還元的な地下水と接触すると、水酸化鉄の分解に伴って砒素が脱着する。これが、堆積物からの砒素溶出の機構の一つと考えられる<sup>8),19)</sup>。

また、堆積物中には前述のようにフランボイダル黄鉄鉱が存在し、これに不純物として含まれる砒素あるいは黄鉄鉱と共存する硫砒鉄鉱中の砒素が式(2)の反応により環境へ放出される<sup>8),19)</sup>。これが第二の堆積物からの砒素の溶出機構であり、溶出水が酸性を示す場合はこの機構が生じていると推定される。

## 7.3 建設工事での自然由来重金属の対策事例

本節では、自然由来の有害物質による環境への影響問題の中でも、環境基準値とはほぼ同等レベルの低濃度での影響が問題とされ、また規模が大きいために対策の経費が莫大となる問題を抱える土木工事における対策事例として、東北新幹線八甲田トンネルと仙台地下鉄東西線の事例を紹介し、これらから明らかとなった自然由来の有害物質対策の問題点について述べる。

## 7.3.1 東北新幹線八甲田トンネルの事例

東北新幹線八甲田トンネルは鉱山地域に位置し、当該地域の河川が鉱山の酸性廃水による汚染を受けた経緯があるため、昭和50年代の計画時から工事に伴う環境汚染について学識経験者や地元自治体からなる委員会により検討が進められた<sup>20)</sup>。その結果、トンネル周辺の金ヶ沢層、四沢層、和田川層には鉱化変質を受けた部分があり、その変質部の岩石から酸性水の発生と重金属等の溶出が懸念されたことから、鉱山地帯の掘削が本格化する2000年からは以下に紹介する対策が講じられた。

## (1) 対策の基本方針

鉱化ズリの処理については、いったん酸性水が発生すると長期間処理を続ける必要性が想定されることから、施工段階での十分な対策、つまり酸性水を発生させない処理方法を開発する必要がある。鉱化ズリからの酸性水発生を防止するには、次のような処理方法が考えられる。

- ① 酸化防止のため還元状態を保つ「還元状態維持型」
  - ② 選鉱設備で硫化鉱物を除去する「処理プラント型」
  - ③ 酸性水を石灰岩等で中和する「中和処理型」
  - ④ 鉱化ズリを地下水・雨水・空気と遮断する「管理型」
- 上記の方法のうち、八甲田トンネルに適した処理方法として、服部ほか<sup>20)</sup>による実験的検討などに基づいて

上記④の「管理型」を処理方法として採用した。また、八甲田トンネルでは掘削ブリ量が膨大（地山で約230万m<sup>3</sup>）となるため、ブリ全量を酸性水が発生するとして一様に処置すると、多大な経費を要する。このため掘削ブリを、排水基準を満たさない浸出水の発生が想定される掘削ブリ（管理型）とそれに該当しないブリ（一般型）とに分別し、前者を産業廃棄物最終処分場と同様の遮水性能を有する土捨場（「管理型土捨場」）に処分し、掘削ブリからの浸出水が下流域の地下水や公共水域に悪影響を及ぼさないことを基本とした<sup>21)</sup>。

(2) 掘削残土の判定方法

八甲田トンネルで図-7.1に示す手順と表-7.1に示す基準値により、酸性水発生に関わる岩石の判定が行われた<sup>22),23)</sup>。まず、肉眼鑑定により鉱脈あるいは鉱石と判断される岩石は「管理型」と判定する。次に、火山岩については帯磁率測定を行い、岩石の帯磁率 ( $\kappa_{cgs} = \kappa_{SI}/4\pi$ ;  $\kappa_{cgs}$  は cgs 単位系,  $\kappa_{SI}$  は SI 単位系) が  $50 \times 10^{-6}$  emu/cm<sup>3</sup> 以上を示す岩石を「一般型」とする。鉱脈・

鉱石以外の全岩種に対して簡易溶出試験を行い、1時間後の溶出水の pH が6.0以下を示す岩石を「管理型」とする。次に1時間後溶出水の pH が6.0を超える岩石について全岩化学組成分析を行い、イオウ含有量が2.0 wt%以上の岩石を「管理型」とし、さらに泥岩についてはイオウ含有量が2.0 wt%未満でも S/Ca モル比が1.0以上を示す場合も「管理型」とする。また、鉛、砒素、セレンの重金属元素含有量がいずれも150 ppm以上の岩石は「管理型」とする。なお、八甲田トンネルでは検証を目的として、分析した全試料について上記のすべての試験を実施し、簡易溶出試験は56日間継続した。

(3) 掘削残土の分別処理工程

一般的なトンネル工事の施工サイクル、掘削ブリを分別・処理する工程の基本的な条件を以下のとおりとした<sup>21)</sup>。

- ①分別量の単位：切羽ごとに掘削ブリを分別することは工事の実態上不可能なため、1日分の掘削ブリ全量を単位として管理することとした。

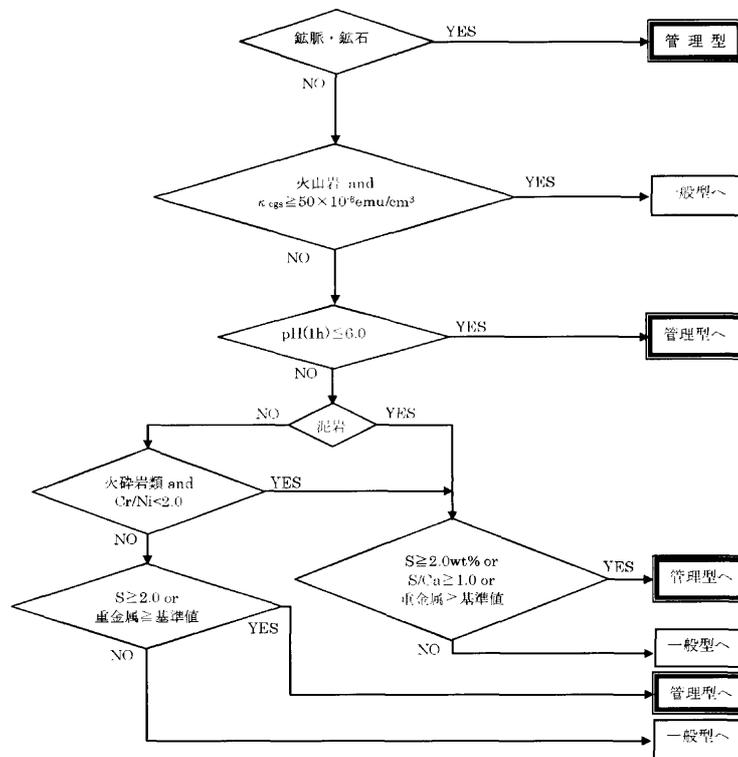


図-7.1 八甲田トンネルにおける掘削ブリ判定フロー

表-7.1 八甲田トンネルにおける掘削ブリ判定基準

判定項目	判定基準値	基準値設定の根拠
帯磁率 ( $\kappa_{cgs}$ )	$\kappa_{cgs} \geq 50 \times 10^{-6}$ emu/cm <sup>3</sup> → 一般型	・基準値以上の火山岩で酸性化を示す試料がみとめられない。 ・基準値以下でSを2.0wt%以上含む火山岩は非常に少ない。
溶出水のpH	1時間後のpH ≤ 6.0 → 管理型	・1時間後の溶出水pHが6.0以下を示す試料はすべて、56日後でも酸性を示す。
火砕岩類のCr/Ni比	Cr/Ni < 2.0 → 泥岩に準拠	・火砕岩類は、Cr/Ni比が1.0前後の試料と2.0以上の試料とに大別される。 ・泥岩のCr/Ni比は1.0前後で、火成岩のCr/Ni比は2.0以上である。 ・Cr/Ni比が1.0前後の火砕岩類の溶出特性が泥岩に類似する。
泥岩および火砕岩類 (Cr/Ni < 2.0) の S/Caモル比	S/Caモル比 ≥ 1.0 → 管理型	・S/Caモル比が増加すると溶出水のpHが低下する。 ・S/Caモル比が1.0以上で溶出水が酸性化する場合は認められる。
S含有量	S ≥ 2.0wt% → 管理型	・溶出水が酸性を示す火成岩類は、Sを2.0wt%以上含むことが多い。

講座

- ②掘削残土判定の所要時間：判定に日数を要すると、その日数分の容量の貯積場（ずりビン）が必要となるため、24時間以内に判定結果を得ることとした。
- ③複数の掘削ズリ貯積場の設置：図-7.2に示すように、トンネル坑口付近の掘削ズリ貯積場（ずりビン）を2区画に区分して2日分の掘削残土を貯留し、岩石の判定後に掘削ズリを土捨場に運搬することにより、管理型ズリを確実に管理型土捨場に処分することとした。

(4) 管理型土捨場の構造

上記(2)で述べた判定方法に基づき、「管理型」と判定された掘削ズリは管理型土捨場に処分される。この管理型土捨場の基本的概念は以下の2点である<sup>21)</sup>。

- ①掘削ズリの酸性化の抑制：トンネル掘削部の地山は還元状態であるため、地山内で酸性水が発生する可能性は低い。したがって、還元状態を維持したまま掘削残土を処分することにより、掘削残土の酸性化を防止することが望ましい。しかし、実際の工事では掘削ズリを湧水・雨水、空気に全く触れさせず土捨場に運搬することや地山と同様の還元状態に維持することは困難である。そこで、土捨場において降水、地下水などの水や空気と遮断することにより、掘削ズリの酸性化を抑制することとする。
- ②将来的な管理型土捨場からの浸出水漏洩の防止：掘削ズリ処分後に管理型土捨場から酸性の浸出水が漏洩した場合、その浸出水を管理する必要がある。また浸出水の発生は、掘削残土の酸性化の進行を促進すると考えられる。

また、土捨場の検討に際しては施設の施工時における経済性を考慮するとともに、掘削ズリ処分後も種々の問題が生じない土捨場設備にすることが求められる。

以上のことを考慮し、管理型土捨場の構造を以下のとおりとした<sup>21)</sup>（口絵写真-17参照）。

- ①底面部：底面部には産業廃棄物最終処分場に準拠した遮水工（図-7.3）を施工した。特に遮水性能の長期的な安定性や経済性を考慮し、二重遮水シートによる遮水構造を採用した。さらに遮水シート損傷防止のために、遮水シートと地山との間には碎石お

よびモルタル吹付け、遮水シート上には保護層として荒砂（ $t=50\text{ cm}$ 厚）を敷設した。また、万が一の損傷に対処するために、漏水検知システム、自動補修システムを導入した。

- ②キャッピング：盛土は施工後の沈下により、何らかの変状等が生じる場合がある。そこで、施工後の変状等による掘削ズリへの雨水浸透を防止し、また確実な雨水の表面排除を確保することを目的に、遮水シートと不透水性土の上位に覆土を行い、覆土と遮水シート（または不透水性土）との間の排水層で浸透水を排除する多重構造を採用した。

(5) 土捨場からの浸出水の水質

今後の自然由来重金属汚染を検討する上で、実際に重金属等を含有する掘削ズリを処理した場所からの浸出水の水質およびその変化を測定し、掘削ズリ処分地からの重金属等の溶出特性を理解することが重要である。ここでは、八甲田トンネルで設置された五つの管理型土捨場のうち、代表的な土捨場からの浸出水の水質について述べる。

この管理型土捨場に処分された掘削ズリの岩種の割合は、火砕岩が約40%、泥岩が約33%、安山岩が約26%である<sup>23)</sup>。図-7.4に浸出水水質の時間変化を示す。施工中の浸出水の湧出量はおおむね10~20 l/minで、キャッピング完了後は急減した。pHは施工開始期に10.5前後と高い値を示したが、それ以降は7.0~7.5の間で推移し、キャッピング後は7.5前後でほぼ一定値を示した。

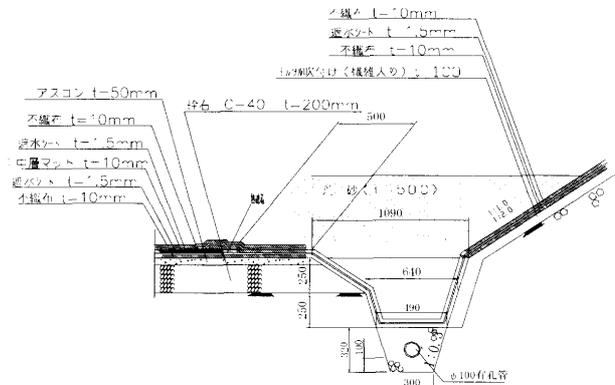


図-7.3 八甲田トンネル管理型土捨場底面構造

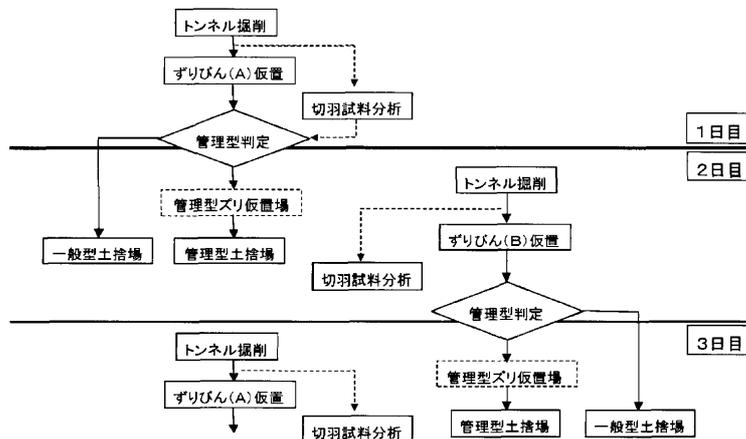


図-7.2 八甲田トンネルでのズリの分別処理工程

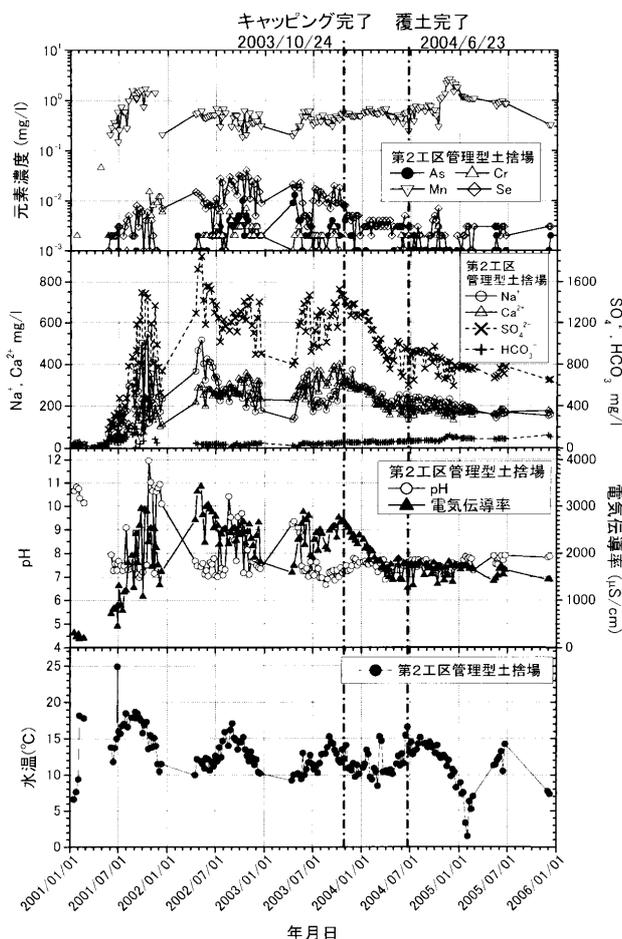


図-7.4 管理型土捨場浸出水の水質の時間変化

電気伝導率は施工開始時に100~200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  を示した後に上昇し、施工中は2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  程度ではほぼ一定となり、キャッピング後は1500~1700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  まで低下した<sup>23)</sup>。

浸出水の  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  濃度は、電気伝導率とほぼ同様の経時的変化を示すが、 $\text{HCO}_3^-$  は施工の初期段階では100~400  $\text{mg}/\text{l}$  で、その後は100  $\text{mg}/\text{l}$  以下で推移し、キャッピング後に若干の上昇傾向がみられた。浸出水中の金属元素濃度では、Mn が定常的に $10^{-1}$ ~1  $\text{mg}/\text{l}$  程度含まれていた。Cr、Se は $10^{-1}$   $\text{mg}/\text{l}$  以下含まれ、電気伝導率と類似した経時的な変化を示した。前述のようにキャッピング後は浸出水の湧出量が減少しているが、電気伝導率や  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  濃度および Se、Cr 濃度も湧出量の減少に伴い低下する傾向が認められた。また、重金属濃度を各基準値と比較すると、施工中は排水基準値以下であり、キャッピング終了後にはすべて環境基準値以下を示した<sup>23)</sup>。

太田は八甲田トンネルの管理型土捨場からの浸出水のイオン濃度から土捨場内部の水-岩石反応を推定している<sup>24)</sup>。ここに例示した管理型土捨場浸出水の  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  モル濃度の相互関係を図-7.5に示す。これらの浸出水におけるイオンのモル濃度比から、土捨場内部では黄鉄鉱の分解だけでなく、斜長石の分解による中和作用も生じていることが推定される<sup>24)</sup>。さらに分解する斜長石の組成が土捨場に処分されたズリの岩質に対応している<sup>24)</sup>。前述したように土捨場からの浸出水

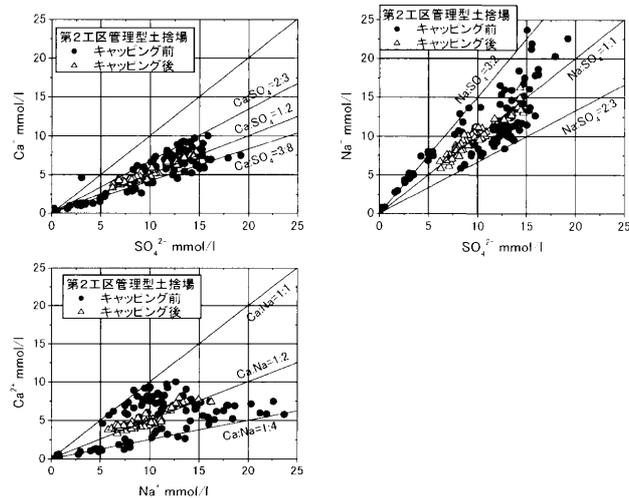


図-7.5 管理型土捨場浸出水の  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  モル濃度の相互関係

が中性を示し、重金属等の濃度も高くないのは、この斜長石の分解による中和作用によると考えられる。

### 7.3.2 仙台地下鉄東西線の事例

土壤汚染に関する意識の向上に伴い、汚染の原因が人為的か自然由来かを判断するために、地盤の重金属元素濃度に関するバックグラウンド値を把握することが求められるようになった。仙台市周辺についても2006年に発行された「土壌・地質汚染評価基本図(1:50000 仙台地域)」<sup>25)</sup>により、仙台市の地盤を構成する地質(主に竜の口層の堆積岩)から砒素やカドミウムの溶出が報告された<sup>12)</sup>。この結果を受け、仙台地下鉄東西線建設に際しては、先の八甲田トンネルの場合と同様に掘削土の溶出特性の評価と処理対策が講じられている。ここでは、仙台地下鉄東西線での対策事例を紹介する。

#### (1) 掘削ズリの性質

東西線の建設の際に掘削対象となる地質の溶出の特徴を把握するために、路線上の鉛直ボーリングで採取したコアを用いて公定法(環境省告示第18号試験)による溶出試験が行われた。公定法では溶出試験の対象を2 mm 以下としているため、ここではボーリングコアを2 mm 以下に粉碎した上で試験に供された。その結果、採取から試験まで3~7ヶ月を経過した試料では溶出水の酸性化と溶出量基準を超過するカドミウムの溶出が認められる場合があった<sup>26)</sup>。また、採取後すぐに試験を実施した試料では溶出水が弱アルカリ性を示し、溶出量基準を超える砒素を溶出する場合が認められた<sup>26)</sup>。

以上の結果から、掘削直後からの即時溶出現象による砒素の溶出と掘削ズリが風化し酸化してから生じる酸化溶出現象に伴うカドミウムなどの溶出現象が想定された。そこで、東西線建設に際しては、これら両方の溶出現象に対する分別判定を行うこととなった<sup>27)</sup>。

#### (2) 分別判定法

溶出に関する掘削ズリの分別判定は、前述のように溶出現象が弱アルカリ領域において砒素を溶出する即時溶出と酸性領域においてカドミウムなどの重金属等を溶出する酸化溶出の二つあることから、それぞれの現象に対

## 講座

する溶出特性を評価する分別判定法が採用された。

即時溶出現象に対しては、公定法で溶出量基準に基づいて砒素に対する対応を判定することとした。山岳トンネル区間については先行水平ボーリングで、開削区間では事前の地層判別時に、それぞれ試験に必要な試料を採取して公的機関で試験を実施している<sup>27)</sup>。

ここでいう酸化溶出のような長期的な溶出現象の評価法は確立されていないため、この溶出現象を評価する手法が検討された。試料採取から時間を経過し酸化した試料の公定法による溶出の傾向と採取直後の新鮮な試料を3%過酸化水素水と反応させた場合の溶出の傾向が類似すること(図-7.6)<sup>26)</sup>から、酸化溶出の評価試験方法として、強制酸化試験(3%過酸化水素水により4時間反応させる方法)が採用された。この時検液のpHが4以下を示す場合にカドミウムなど重金属等が溶出量基準以上の濃度での溶出することが確認されたので、この試験の基準としてpHが4以下の場合を要対策土と判定することとされた。この手法は30%過酸化水素水を用いる方法(地盤工学会「土質試験の方法と解説」中の「過酸化水素水を用いるpH試験方法」<sup>28)</sup>)と異なり、激しい反応は生じず、また反応の収束を判断するのではなく一定時間反応させる方法であるため、分析専門技術者でなくても実施できるので、先行水平ボーリングや地層判別の際に試料を採取し、要対策土掘削の施工管理の一環として現場で実施している<sup>27)</sup>。

## (3) 要対策ブリの処理方針

開削区間では掘削ブりを埋戻し材料として活用することとなるが、その他の工法の区間では屋外の処分地に盛り立てることとなった。屋外の処分地においては、要対策掘削ブリの上面には雨水浸透防止、基面には浸透水拡散防止の措置をそれぞれ講じることとされた<sup>27)</sup>。

## ①対策ぶり上面：最終形状として盛土上面が裸地とな

る場合には、雨水浸透の可能性を否定できないため、遮水シートと覆土で被覆する。一方、要対策掘削ぶり上面の上に一般ブりが盛り立てられる場合や舗装される場合は雨水浸透が抑制されるので、覆土のみで被覆することとなった。

②要対策掘削ぶり基面：基面における浸透水拡散防止の措置法としては、重金属を含む浸透水を物理的に遮断する方法(基面不透水型)と、浸透水の中和と重金属除去により安全な浸透水として地盤に浸透させる方法(吸着および基面透水型)の二つの方法が検討された。施工実績、経済性、周辺住民の理解のしやすさなどから遮水シートを用いた基面不透水型の措置法が採用された。その構造は図-7.7に示すとおり、地山の不陸整形を兼ねて下部の緩衝材を設置し、その上に遮水シート、不織布を敷き、ブリの盛り立て・転圧の際の破損を防ぐために上部緩衝材を設ける構造とした。また、盛り立て施工中の雨水暴露による酸化溶出を防止するために300 mmごとに順次施工を行い、分割施工等で長期間放置する場合は覆土を行うこととした。

## 7.3.3 自然由来重金属の処理方法の課題

以上に建設工事における自然由来の重金属への対応事例を紹介した。ここで紹介した事象は、20世紀の建設工事では環境への影響が顕在化しなければ対策は実施されず、これまでも前述の2例と類似した地質条件で数多くの建設工事が環境への対策を行わずに施工されたが、環境汚染が生じた例はごくまれである。このように事前に対策を講じるようになったのは、「環境の世紀」になってからであり、特に仙台地下鉄東西線のような日本にごく一般的に分布する第三系堆積岩における工事において、自然由来の重金属による環境汚染が問題視されたことは、今後の日本の建設工事に大きな影響をおよぼす

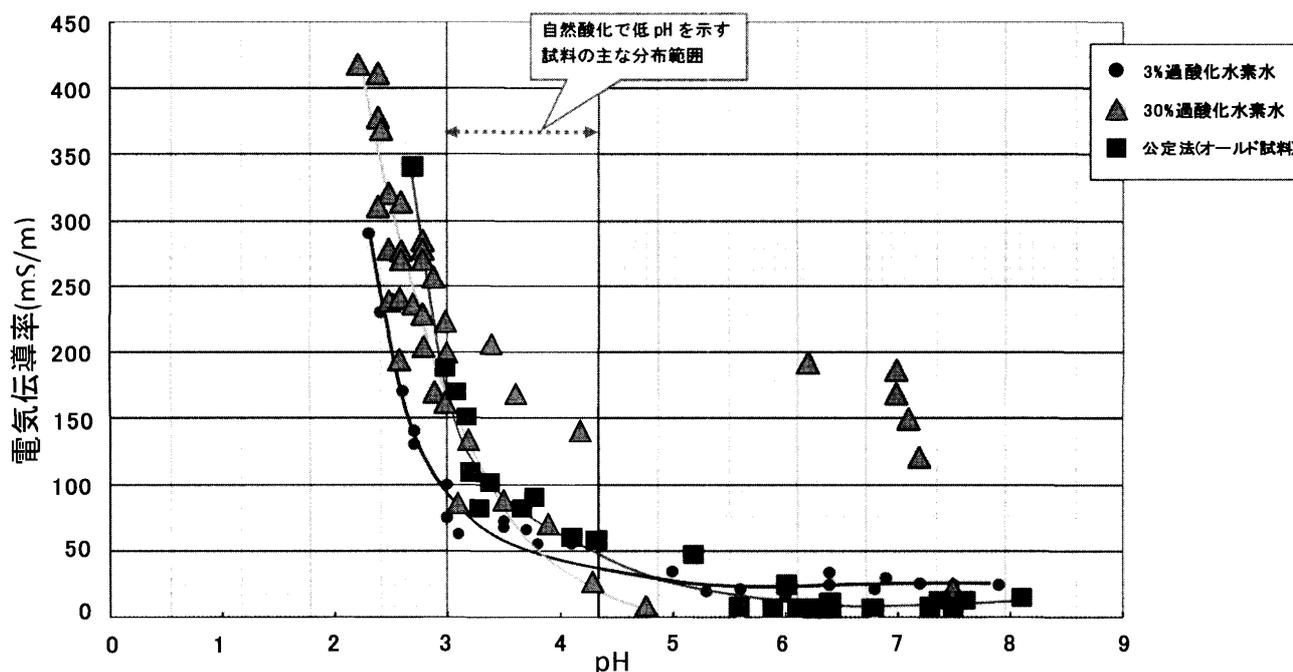


図-7.6 酸化した試料の公定法試験と新鮮な試料の強制酸化試験におけるpHと電気伝導率

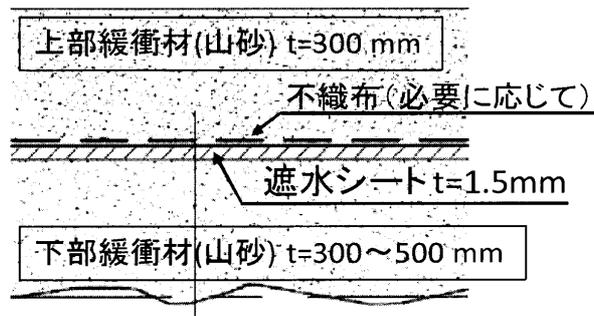


図-7.7 要対策土基面の構造

あろう。

そこで、今後の自然由来重金属を含む掘削ブリの処理のあり方を考える上で、ここにあげた処理の事例から明らかとなった問題点を整理する。服部・太田<sup>29)</sup>が述べたように、八甲田トンネルにおける分別処理方法は酸性水や重金属等の周辺環境への漏洩に対して十分安全側の対策であったと考えられている。しかし、仙台地下鉄東西線の事例も併せて考えると、これらの事例における分別処理方法について、施工上、経済上の観点から以下の問題点があげられる<sup>29)</sup>。

- ① 切羽から採取した掘削ブリの判定に時間を要する。  
仙台地下鉄では公定法を用いたため、判定が試料採取の翌日以降となった。また、八甲田トンネルでは分析等の時間的制約からブリの土捨場への搬出が掘削の翌日となり、工程が繁雑となった。
- ② 酸化溶出など長期的な溶出現象の評価は、八甲田トンネルでは全岩分析による溶出能力の評価で行い、仙台地下鉄では過酸化水素水を用いた強制酸化試験による評価を行うなど、評価法自体が確立されていない。
- ③ 判定基準値は、いずれの事例でも現地試料を用いた実験結果によるため、汎用的な基準値ではない。
- ④ 八甲田トンネルにおける5ヶ所の管理型土捨場からは、重金属や酸性水の溶出の危険性の高いブリを集積したにもかかわらず、酸性や高濃度の重金属元素を含む浸出水が発生しなかったことから、さらに経済的に処理できる判定基準や土捨場構造などを検討する余地があると考えられる。

#### 7.4 今後の自然由来重金属対策の考え方

前節で述べたように、八甲田トンネルにおける重金属等を含む掘削ブリの分別処理方法はおおむね妥当であったが、施工結果からいくつかの問題点が明らかとなった。この八甲田トンネルでの実績をもとに、服部ほか<sup>23)</sup>、服部・太田<sup>29)</sup>は、今後の工事では事前調査で掘削対象とする岩石の岩石学的・鉱物学的な性質に基づいた溶出特性と環境への影響程度を把握しておくこと、環境への影響を評価する際には現地の地質状況、水文環境、水利用状況等を勘案したうえで設定するべきであること、などを提案している。また、奥村ほか<sup>30)</sup>も同様な提案をしている。

土壤汚染対策法は2009年度の改正により、汚染状況

を把握するための制度が拡充され、規制対象区域の分類により講ずべき措置内容が明確化され、また搬出土砂の適正処理の確保が求められるようになった。しかしながら、建設工事等で問題となる自然由来の重金属を含有する土砂について法の対象とするか否かは都道府県知事の判断になると考えられる。そこで自然由来の重金属を含有する土砂が法の対象とならない場合の対処が、「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（暫定版）（案）」<sup>31)</sup>で提案された。このマニュアルでは、主に建設工事で発生する掘削ブリに含まれる重金属等について、施工前から施工中までの調査・試験による溶出特性の把握、その結果に基づいた工事対象地域周辺におけるリスク評価、対策施工前から施工後までのモニタリングのそれぞれの手法が示されている。その中で、掘削対象となる岩石について重金属等の全含有量分析によりスクリーニングすることを提唱している。この手法を導入することにより、土壤汚染対策法施工以降の流れであった岩石への溶出量基準の適用で生じた、対象岩石にほとんど含まれない重金属元素が溶出量基準を超過することによって過剰に評価されることを避けることが期待できる。また、岩石の溶出能力については、現地の状況を再現した試験によって評価することも提案している。一方、岩石に含まれる自然由来重金属等による「汚染」のリスク評価では、現地の地盤条件等を考慮したサイト概念モデルに対して数値解析による評価を提案している。また、環境への影響の評価に際しては、環境保全関連法規の基準値だけではなく、工事対象地域における地下水や河川水の施工前の重金属等の濃度（バックグラウンド値）を考慮することが示されている。このようなサイト概念モデルを用いてバックグラウンド値で評価することにより、もともと地下水環境基準値よりも大幅に高い濃度を示す地下水や河川水の影響範囲において、これら地下水、河川水よりも低い濃度で溶出量基準をわずかに超過するような岩石を「要対策」と判断する矛盾をなくすることができる。さらに対策工については、サイト概念モデルによるリスク評価を行うことを前提に、土壤汚染対策法に示されている不溶化や封じ込め以外の自然物質による吸着や自然の風化作用による重金属等の早期溶出現象を利用した方法を示している。

服部ほか<sup>23)</sup>、服部・太田<sup>29)</sup>、奥村ほか<sup>30)</sup>および「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（暫定版）（案）」<sup>31)</sup>のいずれにおいても、岩石に含有される自然由来の重金属に対しては、対象とする岩石の重金属等の溶出能力を岩石学的特徴や現地の状況から評価し、現地の状況に応じた環境への影響評価を行い、それに対応した対策を実施することが提案されている。今後、いわゆる自然由来重金属等の対応については、このような対象岩石周辺の「自然」を正しく評価することが、経費節減の観点からも望まれる。

#### 7.5 おわりに

本章では、岩石などに自然に含有される重金属の溶出

## 講座

の機構と最近の建設工事におけるこの溶出現象への対策事例、そして今後の対策の考え方について述べた。日本の公害の原点は鉱山からの廃水や煤煙等による鉱害であり、自然に重金属が濃集した地質に由来することから、自然由来の重金属の環境への影響を考慮することは重要である。しかしながら、鉱害に至るほど重金属が濃集した地質が分布する地域は限られており、日本においてはほぼ把握されていると考えてもよい。また、鉱山を形成するような地質ではないごく「普通」の地質でも様々な濃度で重金属等は普遍的に含有され、この重金属等の地下水等への溶出もごくありふれた現象である。土壌汚染対策法施行以降、「普通」の地質における建設工事の際に同法を適用してズリ処理対策を講じる例が急増した。今後も「普通」の地質を対象とした建設工事において、自然由来の重金属に対する環境への影響への対策が求められることが多くなると予想される。しかし、これまでに日本の「普通」の地質に由来した健康被害の事例が報告されていないこと、土壌汚染対策法で定められた試験法が岩石の溶出現象を正しく再現しているか不明なこと、高い重金属含有量のズリを集めて処理した場所からの浸出水も高い重金属濃度を示さないことなどから、また、特に公共工事では投資される税金の「無駄遣い」をしないという意味でも、建設工事における自然由来の重金属への冷静な対応が望まれる。

## 参考文献

- 久保田善裕：鉱山廃水と公鉱害・現代の環境汚染，資源環境地質学—地球史と環境汚染を読む—，資源地質学会，pp. 363～368，2003.
- 馬場俊幸・江頭和彦：日本における土壌汚染問題と対策に関する環境科学的考察，九大農芸誌，Vol. 59，No. 2，pp. 203～216，2004.
- 畑 明郎：土壌・地下水汚染広がる重金属汚染，有斐閣選書，東京，2001.
- 中村家政・荒尾龍喜・井上勝平・小野友道・石井芳満・佐藤隆久・河南憲太郎・前川嘉洋・桑原宏始：宮崎県土呂久地区に発生した慢性砒素中毒症について（第1報），熊本医学会雑誌，Vol. 47，pp. 486～515，1973.
- 後藤達夫：旧松尾鉱山跡地における酸性水の水質挙動について(1)，水，Vol. 30，No. 7 (no. 417)，pp. 69～77，1988.
- 後藤達夫：旧松尾鉱山跡地における酸性水の水質挙動について(2)，水，Vol. 30，No. 8 (no. 418)，pp. 18～28，1988.
- 近藤紘之：福岡県危険地域地下水の砒素汚染の概況，水環境学会誌，Vol. 20，pp. 438～442，1997.
- 島田充堯：砒素の汚染された地下水の起源と問題点—福岡県の2つの事例を基にして—，資源環境対策，Vol. 37，pp. 690～695，2001.
- 殿界和夫・鶴牧道二・三田村宗樹・加藤紀代子：高槻市における砒素含有地下水と浄水処理について，地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会第3回講演集，pp. 135～140，1994.
- van Geen, A., Radloff, K., Aziz, Z., Cheng, Z., Huq, M. R., Ahmed, K. M., Weinman, B., Goodbred, S., Jung, H. B., Zheng, Y., Berg, M., Trang, P. T. K., Charlet, L., Metral, J., Tisserand, D., Guillot, S., Chakraborty, S., Gajurel A. P. and Upreti, B.N.: Comparison of arsenic concentrations in simultaneously-collected groundwater and aquifer particles from Bangladesh, India, Vietnam, and Nepal, Applied Geochemistry, Vol. 23, pp. 3244～3251, 2008.
- Berg, M., Tran, H. C., Nguyen, T. C., Pham, H. V., Schertenleib, R. and Giger, W.: Arsenic contamination of ground and drinking water in Vietnam: a human health threat, *Env. Sci. Technol.*, Vol. 35, pp. 2621～2626, 2001.
- 丸茂克美：自然由来の重金属に起因する土壌汚染問題への地球科学的アプローチ，地学雑誌，Vol. 116，pp. 877～891，2007.
- 仙台市：記者発表資料，自然的原因により重金属が環境基準を超える建設発生土の対応について，<http://www.city.sendai.jp/soumu/kouhou/houdou/07>，2008年4月14日，2008.
- SINGER, P. C. and STUMM, W.: Acidic mine drainage: the rate determining step, *Science*, No. 167, pp. 1121～1123, 1970.
- 笹木圭子：黄鉄鉱の常温酸化溶解に関する実験地球化学的研究，鉱物学雑誌，Vol. 27，No. 2，pp. 93～103，1998.
- 富岡祐一・広吉直樹・恒川昌美：砒素含有鉱物に由来する環境汚染と修復に関する研究の動向—特に鉱滓堆積場における砒素の溶出と固定について—，環境資源工学，Vol. 52，No. 3，pp. 145～150，2005.
- 粕武：堆積岩の化学組成による堆積環境の研究—特に硫黄含有量による識別—，地質調査所月報，Vol. 43，pp. 473～548，1992.
- 桜本勇治：海成泥岩が酸性水を発生させる可能性について，地下水技術，Vol. 36，pp. 29～33，1994.
- 島田充堯：砒素に汚染された地下水の起源と問題点，資源地質，Vol. 53，pp. 161～172，2003.
- 服部修一・太田岳洋・木谷日出男：鉱山地域におけるトンネル掘削残土の管理手法に関する検討，トンネル工学研究論文・報告集，Vol. 12，pp. 53～60，2002.
- 服部修一・太田岳洋・蓼沼慶正：鉱山地帯を貫く八甲田トンネル掘削における環境対策，地質と調査，No. 95，pp. 13～18，2003.
- 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—鉱山に近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.
- 服部修一・太田岳洋・菊地良弘：八甲田トンネルにおける掘削残土の酸性水溶出に関する判定手法の評価，応用地質，Vol. 47，No. 6，pp. 323～336，2007.
- 太田岳洋：浸出水水質からみた土捨場内部での水・岩石相互作用—八甲田トンネル管理型土捨場内部では何が起ったか—，日本応用地質学会平成18年度研究発表会講演論文集，pp. 213～216，2006.
- 産業総合技術研究所：土壌・地質汚染評価基本図（1：50 000 仙台地域），2006.
- 門間聖子・森研一郎・堀 修・野澤昌宏：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，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.
- 仙台市：仙台市地下鉄東西線技術検討委員会（第3回）建設発生土部会資料，2008.
- 地盤工学会：土質試験の方法と解説，第3編 化学試験，第2章 土懸濁液のpH試験，2.5 規格・基準以外の試験方法，2.5.3 過酸化水素水を用いるpH試験方法，pp. 164，2000.
- 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.
- 奥村興平・櫻井國幸・中村直器・森本幸男：自然起源の重金属等による環境への影響と対策，地学雑誌，Vol. 116，No. 6，pp. 892～905，2007.
- 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（暫定版）（案），土木研究所資料，第4156号，80p.，2009.