

重金属等含有岩石・土壌の対策技術としての吸着層工法と 吸着シートの適用についての研究

株式会社	イーエス総合研究所	○木川	えり子
同上		佐藤	研
株式会社	ケー・エフ・シー	西里	亮
同上		大塚	治
凸版印刷	株式会社	北村	洋一
室蘭工業大学		吉田	英樹

1. はじめに

近年、トンネル現場等で自然由来による重金属等を含有した岩石・土壌がほぼ全国的に発生しており¹⁾、特に砒素の事例が多く報告されている。これはわが国には、熱水変質の影響を受けた火山岩類や海成堆積岩類が広く分布し、これらの中には、土壌環境基準を超過した重金属等が含有している場合があるからである²⁾。

土壌汚染に関する法律としては、土壌汚染対策法が施行され、人為的・自然的原因を問わず、重金属等を含有した土壌については、適切な汚染防止対策措置が必要となった³⁾。さらに土壌汚染対策法の対象外とされている2mm以上の岩石（トンネル掘削ずり等）についても、「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」において適切な対策が望まれている⁴⁾。

土壌汚染対策技術としては、遮水工封じ込め、固化・不溶化、透過性地下水浄化壁、土壌洗浄⁵⁾、現地発生土（粘性土）を利用した汚染土を被覆する対策や、不溶化材を用いた重金属の溶出低減対策、重金属を含む盛土の下に吸着材を混合した吸着層を敷設し重金属等の地下浸透を防止する吸着層工法が提案されており、中でも吸着層工法は比較的低コストである方法として特に北海道を中心に事例が増えている。

吸着層工法は、吸着層を通過した浸出水の重金属濃度を低減させる方法である。また、影響予測を行うことでより合理的な対策が可能である。一方で、吸着層工法は重金属等含有岩石・土壌を搬入する前にあらかじめ吸着層を施工する必要があり、吸着材と母材となる土壌を攪拌機等により均一に混合することが求められる。また、斜面等の現地形状によっては施工が困難な場合もある。

筆者らは、吸着層で使用する吸着材である鉄系吸着材「インターフェイス SMV#IR」の開発をしていたが、実際の使用現場に立ち会う中で上述のような施工上の課題があると知り、吸着層施工の省力化が必要であると考えた。そこで、吸着層のプレキャスト化に着目し吸着材をシート状に工場生産した吸着シート「パデムシート」（以下、「吸着シート」）を研究・開発した。吸着シートは工場生産品のため現場での混合及び均一性の確認をする必要がなく、遮水シートと同様にロール状の製品を敷く方法なので斜

面での施工も比較的容易である。

本報告では、吸着層工法の紹介に加え、吸着シートの吸着性能及び耐破損性について検証した結果を報告する

2. 吸着層工法の概要と施工上の課題

2.1 吸着層工法の概要

吸着層工法は、吸着材と母材を混合した吸着層を用いて、重金属等を含有する掘削ずり等（以下、「重金属掘削ずり」）中の重金属等が地下水に浸透・拡散することを低減する対策である。吸着層工法の概要を図-1に示す。吸着層工法は、あらかじめ造成した吸着層の上に重金属掘削ずりを盛土し、覆土にてキャッピングする構造である。降雨等により重金属掘削ずりから重金属等を含む浸出水が発生した際、その浸出水が盛土下部に敷設された吸着層を通過することで、吸着層中の吸着材と反応し、浸出水中の重金属濃度を低減することができる。

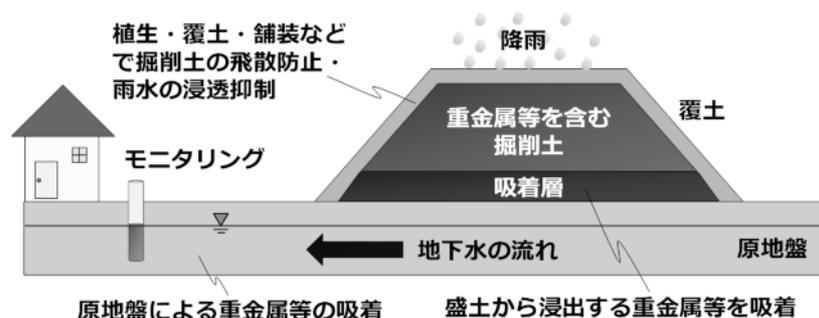


図-1 吸着層工法の概要

人工資材による自然由来重金属等を含む掘削土対策の設計，施工マニュアル⁶⁾

2.2 吸着層の設計

吸着層の設計では、吸着材の特性や吸着性能、現場及び周辺地域の状況、盛土高さ、重金属掘削ずりの溶出特性等を考慮し適切な吸着材を選定し、吸着材の配合量を設計する。吸着層は層厚 30 cmと設計されることが多い。また、透水性については、重金属等を含む浸出水が必ず吸着層を通過する必要があるため、吸着層の透水係数は覆土の透水係数と同程度かそれよりも高くなくてはならないとされている⁷⁾。そのため、吸着層の透水性を考慮し母材、覆土を選定する必要がある。

また、吸着層は吸着材が均一に混合されていることを想定して設計されており、吸着層が適切な効果を発揮するためには、均一性を確認することが必要である。そのため、設計配合量が少量である場合は、攪拌機械の性能を勘案し最低配合量を設定する必要がある⁸⁾。

2.3 吸着層施工の現状

吸着層の施工は、吸着層の母材となる土と設計配合量の吸着材を攪拌機械により均一に混合する。北海道で実施した吸着層の施工状況を写真-1，写真-2に示す。攪拌機械は、バックホウ，スタビライザ，自走式土質改良機等あり，地形状況，土量，作業ヤード等の条件を考慮し選定する。斜面の施工においては吸着層を法面に施工するため工夫が必要である。



写真-1 ミキシングバケットによる混合



写真-2 スタビライザによる混合

2.4 吸着層の品質管理試験の現状

吸着層が適切な効果を発揮するためには、均一性を確認することが必要であるため、一定土量ごとに、吸着層の品質管理試験を行い、均一性を確認する。品質管理試験は、施工後の吸着層を採取し分析機関で実施する。採取した吸着層5点に対象重金属を含有する溶液を添加して振とうし、ろ過後の溶液濃度を測定して、吸着性能にばらつきがないことを確認する。

2.5 吸着層工法事例における施工上の課題

実際にいくつかの吸着層施工に立ち合う中で感じた施工上の課題を以下に述べる。

- ①現場の近隣で透水性等の条件を満たす適切な母材の入手が困難な場合がある。
- ②斜面等の施工は小段の整形及び斜面に吸着層を貼り付ける必要があり，平面よりも多くの工程があるため時間・労力がかかる。
- ③吸着層の施工及び確認試験が終了するまで重金属掘削ずりを搬入できない。
- ④想定量以上の重金属掘削ずりが発生した際，吸着層を新たに施工する必要があるが，吸着材や攪拌機械の調達等が時間的制約となる。

吸着層工法の理念は非常に合理的ではあるが，実際の施工では上記のような課題に直面する場合がある。次項では，これらの施工上の課題を改善する目的で開発した吸着シートの概要，施工方法及び性能を示す。

3. 吸着シートの概要及び施工方法

3.1 吸着シートの概要

吸着シートは、還元鉄を主成分とした鉄系吸着材を親水性不織布に内包させシート状に成形したものである。吸着シートの概要を図-2 に示す。製品は、幅 1.5m、長さ 20m、厚さ 2mm を 1 巻きとしており、重量は約 120 kg、荷姿及び外観は写真-3、写真-4 に示すとおりである。

吸着シートの吸着材充填量は 3 kg/m^2 であり、厚さ 30 cm の吸着層に換算すると 10 kg/m^3 の添加量に相当する。また、吸着シートの透水係数は $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ m/s}$ であり、土の一般的な値⁹⁾と比較すると微粒砂からシルトと同程度である。筆者らが過去に吸着層（細粒分混じり砂）の現場透水試験をした際、その透水係数は平均 $3 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 程度であったことから、吸着シートの透水性は実際の吸着層で想定される範囲であると考えられる。

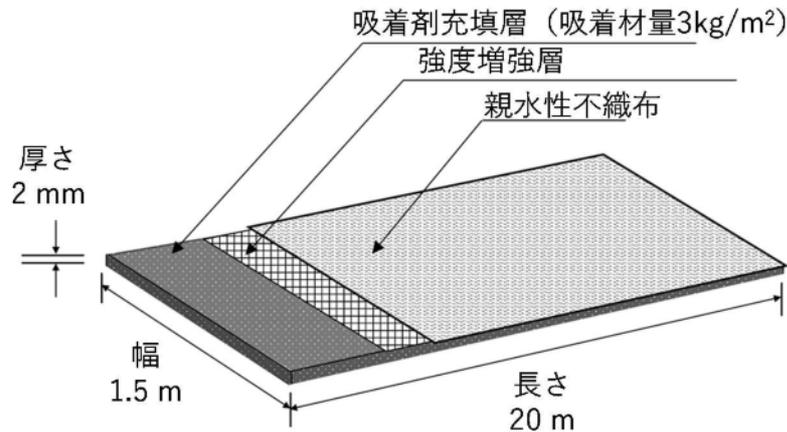


図-2 吸着シートの概要



写真-3 吸着シートの荷姿



写真-4 吸着シート片の外観

3.2 吸着シートの施工方法

吸着シートの施工方法を図-3 に、施工状況を写真-5～写真-8 に示す。基盤整地後、

保護マット，吸着シート，保護マット，保護土の順に敷設する。保護マット，吸着シートともに継ぎ目を溶着し，保護マット及び吸着シートがずれないように施工する。溶着には，産業廃棄物処分場等で用いられている遮水シートと同様に電磁誘導溶着機を使用し，特殊な機械を用意しなくても施工可能である。

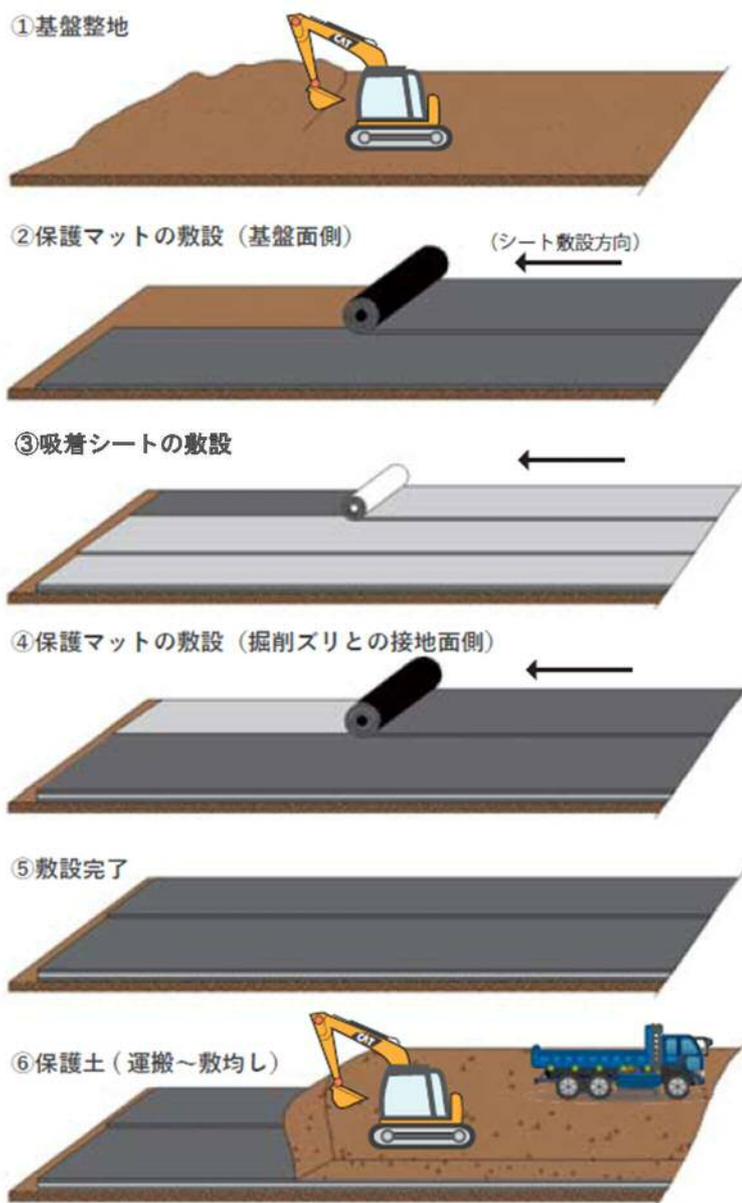


図-3 吸着シート施工方法



写真-5 保護マット敷設



写真-6 吸着シート敷設



写真-7 吸着シート溶着



写真-8 保護マット敷設

また、斜面の施工状況を写真-9、写真-10 に示す。斜面についても、吸着シートを敷き、溶着することで施工できる。



写真-9 斜面敷設状況



写真-10 斜面溶着状況

4. 吸着シートの性能

吸着シートの性能については、重金属等の吸着性能があること、施工に対する耐破損性を持つことが必要である。この2点について検証を行った結果を以下に述べる。

4.1 吸着性能

重金属等の吸着性能については、吸着シートに重金属等を含む溶液を通水し、吸着シート通過後の溶液濃度を測定してその低減の程度を確認した。重金属等の吸着は重金属等と吸着シート中の吸着材との反応時間、すなわち重金属等が吸着シートを通過する速度が影響すると考え、段階的に通水速度を変化させた試験を実施した。

4.1.1 カラム試験方法

試験方法は、汚染物質の溶出挙動の情報を得ることを目的とした ISO/TS 21268-3 上向流カラム通水試験¹⁰⁾を準用した。本試験の上向流カラム概要を図-4、カラム外観を写真-11 に示す。カラムは高さ 10 cm、直径 5 cm のアクリル製円筒であり、その中に 5 号珪砂を充填し、上部に吸着シートを 1 枚設置した。なお、5 号珪砂は蒸留水を用いた水締めにて充填している。設置後、カラム底部から重金属を含む試験溶液を上方向に通水し、吸着シートを通過した試験溶液の濃度を測定した。試験溶液は基準超過事例が多い砒素溶液とし、ヒ酸ナトリウム ($\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) を溶解して排水基準である 0.1mg/L 前後に調製した。

流量の条件については、ISO/TS 21268-3 に規定された流量は 10~15 mL/h であるが、本試験ではそれに相当する 13 mL/h に加え、98 mL/h、226 mL/h、500mL/h の流量でも実施した。流量条件を時間雨量に換算すると 7 mm/h、50 mm/h、115 mm/h、255 mm/h となる。時間雨量として考えると、野外に造成された盛土に対し、豪雨が極めて速

い浸透速度で流入することも想定した条件とした。通水時間は基本 24 時間とし、流量 13 mL/h は 792 時間行った。通水直後は 5 号珪砂を充填する際に使用した蒸留水が流出するため、通水 1 時間以降の砒素濃度を整理した。

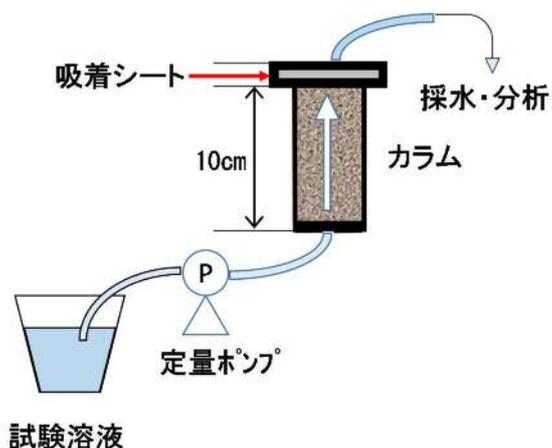


図-4 上向流カラム概要

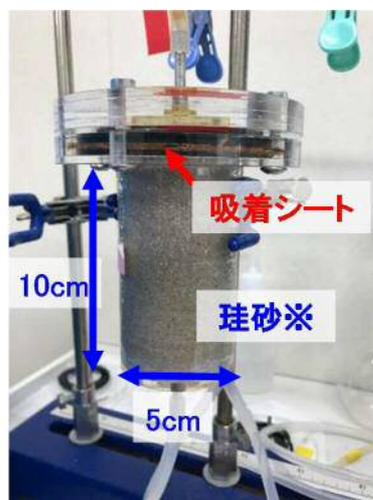


写真-11 カラム外観

4.1.2 カラム試験結果

カラム試験結果を図-5～図-8 に示す。カラム試験の結果、どの流量においても、吸着シートを通過することにより試験溶液は初期濃度より低減しており、24 時間経過しても吸着効果は持続した。また、流量 13mL/h の条件では 792 時間（33 日間）経過しても高い吸着効果を維持していた。

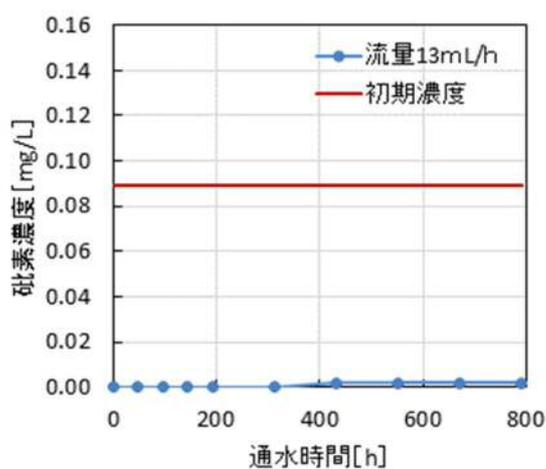


図-5 流量 13mL/h(流速 7 mm/h) の結果

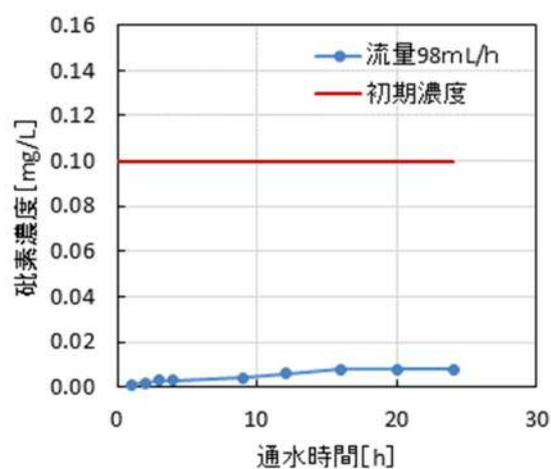


図-6 流量 98mL/h(流速 50 mm/h) の結果

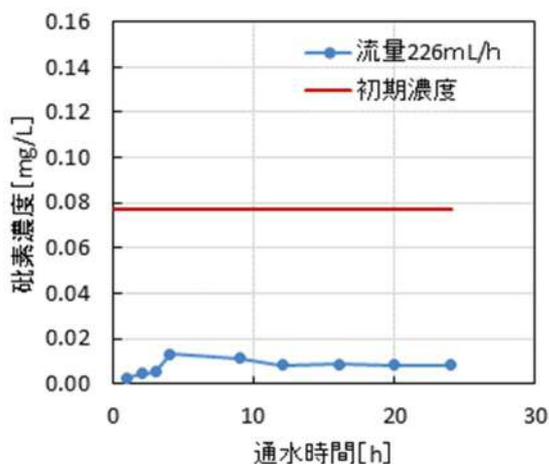


図-7 流量 226mL/h(流速 115 mm/h) の結果

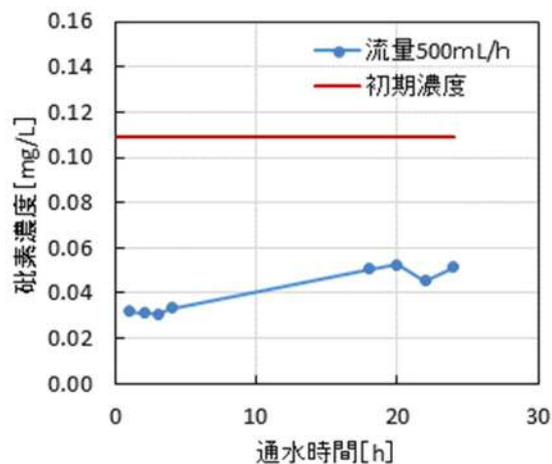


図-8 流量 500mL/h(流速 255 mm/h) の結果

次に流速と平均除去率の関係を図-9 に示す。図-9 の結果より、流速と平均除去率には関係性があり、流速が遅いほど砒素の除去率が高いことがわかる。吸着シートの透水係数から流速を換算すると 3.6~36 mm/h となり、その流速においては除去率 97%以上を期待できる。

以上より、吸着シートを通過することにより砒素濃度は低減し、流速が遅いほど除去率は高くなるという結果が得られた。時間雨量として 100 mm/h 程度でも、除去率 90% の効果を示す結果となった。

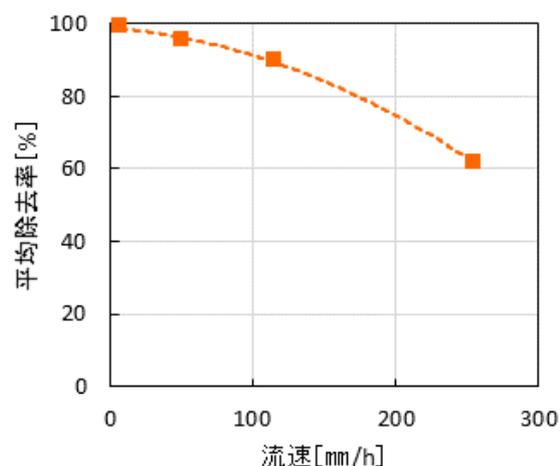


図-9 流速と平均除去率の関係

4.2 耐破損性

吸着シート施工の際には、重機走行時の荷重によって底面に敷設した吸着シートが破損することが懸念され、吸着シートが破損した場合、破損箇所から重金属等を含む浸出水が漏洩する恐れがある。そこで、廃棄物処分場で使用される遮水シートについて提案されている重機走行試験を実施し、施工に対する耐破損性を確認した。

4.2.1 重機走行試験方法

試験は、基盤整地後に保護マット、吸着シートの順で敷設し、その上に保護マット1枚 (Case1) または2枚 (Case2) の条件で敷設した。その上に盛土 (保護土) を敷設し、その上をバックホウが前後に移動することで吸着シートに負荷をかけた。重

機走行終了後、吸着シートの上面を出し、破損の有無を確認した。使用した重機は、キャタピラージャパン製の汎用小旋回機 311D RR（重量約 12,000kg, 0.45m³仕様, 全長 6,910mm, 全高 2,860mm, 全幅 2,490mm）である。試験概要を図-10 に示す。



図-10 重機走行試験概要

4.2.2 重機走行試験結果

試験の結果を写真-12～写真-13 示す。どちらの条件においても、吸着シートに破損はみられず、保護マット等を併用することにより、通常想定する施工において耐破損性は問題ないと考えられる。



写真-12 Case1 試験後
(保護シート 1 枚)



写真-13 Case2 試験後
(保護シート 2 枚)

5. おわりに

北海道にて事例が増えている吸着層工法について、吸着層工法の理念はそのままにしながら、課題となる施工性について吸着層のプレキャスト化を目指し、吸着シートを研究・開発した。本報告では、吸着シートの吸着性能及び耐破損性について検証した。その結果、吸着性能においては、吸着シートを通過することで、砒素濃度が低減し、流速が遅いほど効果が高いことがわかった。実際の吸着シートの透水性から考えると、排水基準程度の砒素除去率は 97%以上、時間雨量 100 mm/h を想定した試験でも

砒素除去率 90%という結果が得られており、吸着層として十分機能すると考えられる。また、重機走行試験により耐破損性を確認したところ、吸着シートの上に保護マット及び盛土（保護土）を敷設することで、その上を重機が走行しても吸着シートは破損していないことを確認した。通常想定する施工において耐破損性は問題ないと考えられる。

今後、吸着シートを使用すれば、現場施工の省力化を実現でき、これまで必要だった吸着層母材や攪拌機械の調達、施工後の品質確認試験が軽減できると考えられる。今回は試験的な結果であるが、今後実際の重金属掘削ずり等を用いたカラム試験、試験施工及び長期的な吸着効果の検証試験を実施し、さらなるデータ蓄積を行いたいと考えている。

参考文献：

- 1) 田本修一・伊東佳彦・岡崎健治・五十嵐敏文(2007)：覆土による重金属汚染対策に関する現場実験，地盤工学会北海道支部技術報告書，第 47 号，pp. 247-250
- 2) 野呂田 晋・遠藤祐司・八幡正弘・伊東佳彦・日下部祐基・田本修一(2007)：建設発生土に含まれる自然由来有害物質に関する地質学的検討，同上平成 19 年度研究発表会講演予稿集，第 27 号，pp. 5-8
- 3) 環境省 水・大気環境局 土壤環境課(2019)：土壤汚染対策法に基づく調査及び措置に関するガイドライン改訂第 3 版，p. 9
- 4) 建設工事における自然由来重金属等含有土砂への対応マニュアル検討委員会(2010)：建設工事における自然由来重金属等含有岩石・土壤への対応マニュアル(暫定版)pp. 26～28
- 5) 地盤工学会(2008)：続・土壤・地下水汚染の調査・予測・対策，pp. 79～90
- 6) 北海道環境保全技術協会 (2017)：人工資材による自然由来重金属等を含む掘削土対策の設計，施工マニュアル，p. 9
- 7) 北海道環境保全技術協会 (2017)：人工資材による自然由来重金属等を含む掘削土対策の設計，施工マニュアル，p. 26
- 8) 北海道環境保全技術協会 (2017)：人工資材による自然由来重金属等を含む掘削土対策の設計，施工マニュアル，p. 38
- 9) 地盤工学会(2009)：地盤材料試験の方法と解説，p. 450
- 10) 保高徹生・肴倉宏史・田本修一・ISO/TC190 部会(2018)：上向流カラム通水試験の国際標準化への取組状況(4)，第 24 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