

平成 22 年度

現地発生土を用いた自然由来重金属の溶出対策に関するカラム試験

寒地土木研究所 道東支所 ○葛西 隆廣
寒地土木研究所 防災地質チーム 田本 修一
帯広開発建設部 足寄道路事務所 深谷 弘明

北海道ではトンネル建設などの建設工事によって発生する掘削ずりから環境基準を超えた重金属類や酸性水が流出する事例が確認されている¹⁾。この対策として現地で発生した土砂に重金属類等を吸着させる方法がある。この方法は低コストであるが、施工事例が少なく合理的な設計手法が確立されていない。そこで実際のトンネル工事で発生した掘削ずりを用いて重金属類の溶出挙動を把握するとともに、現場で発生した火山灰を吸着層として用いたときの吸着効果を把握するためにカラム試験を行った。その結果、重金属類の溶出挙動は、重金属類の種類によって傾向に大きな違いがあり、対策として現場で発生した火山灰を吸着層として用いる方法の有効性と適用条件を確認できた。

キーワード：重金属、自然由来、土壤汚染、溶出量

1. まえがき

北海道内の建設現場では、自然由来の重金属類を含有する掘削ずりが発生することがある。これまで重金属類を含有する掘削ずりの処理は、管理型の処分場に搬出することが多かった。しかしこの処理方法は、多大なコストを要するため、低コストで適切に処理できる方法が求められている。

寒地土木研究所では、多量に発生する掘削ずりを低コストで処理するため、重金属類を現地発生土に吸着させる手法について調査研究を行っている。

本報告では、昨年度より実施している屋外カラム試験について、降雨傾向の違いが溶出量に与える影響、及び現場付近で採取した火山灰による重金属類の吸着効果について報告する。

2. 試験の概要

(1) 試験対象試料

試験に用いた試料は、トンネル掘削ずり、及び現場付近で採取した火山灰である。試料の詳細は、前報²⁾を参照されたい。試験開始前における掘削ずりの重金属類の含有量試験結果、及び溶出量試験結果を表-1に示す。この表より、重金属類の含有量について、基準値を超過したものはなかったが、溶出量についてはセレンとホウ素が基準値を超過していた。また、基準値以下ではあるが、ヒ素が検出された。

掘削ずりは試験実施前に粉砕した後、粒径が2mm以下、及び9.5mm以下にふるい分けた。試料全体を均一にするため、混合し試験に供した。

表-1 試験開始前の溶出量と含有量（泥岩）

溶出量試験分析試験結果				含有量試験分析試験結果			
分析項目	単位	溶出量基準値	分析値	分析項目	単位	含有量基準値	分析値
砒素	mg/l	0.01	0.007	砒素	mg/kg	150	6.9
セレン	mg/l	0.01	0.020	セレン	mg/kg	150	0.59
鉛	mg/l	0.01	<0.005	鉛	mg/kg	150	13.8
カドミウム	mg/l	0.01	<0.001	カドミウム	mg/kg	150	0.04
六価クロム	mg/l	0.05	<0.005	総クロム	mg/kg	250	66.1
総水銀	mg/l	0.0005	<0.0005	総水銀	mg/kg	15	0.18
フッ素	mg/l	0.8	<0.1	フッ素	mg/kg	4000	115
ホウ素	mg/l	1.0	1.77	ホウ素	mg/kg	4000	113
鉄	mg/l		0.01	鉄	%		3.14
硫酸イオン	mg/l		38.5	総硫黄	%		0.24
カルシウム	mg/l		44.1	カルシウム	%		1.54
シリカ	mg/l		16.6	強熱減量	%		4
電気伝導率	mS/m		88.5	含水率	%		6.9
pH			11.5				

※含有量試験結果は、底質調査方法によるほか、総硫黄はJIS M 8122による。

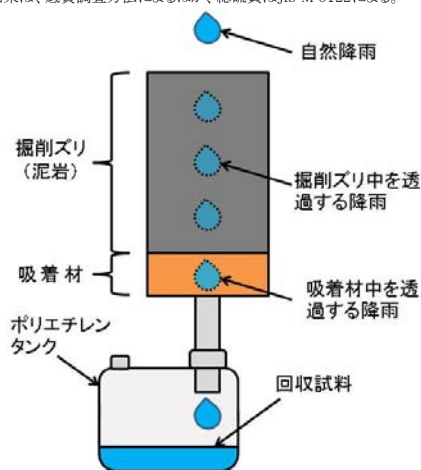


図-1 試験装置の模式図

(2) 試験方法

カラム試験は、塩化ビニル製のパイプ（内径298mm）に掘削ずりと吸着層を入れた試験装置（図-1）を現地工

事事務所敷地内に設置して行った。表-2に試験ケース一覧表を示す。試験は、ずりの粒径と層厚、吸着層の層厚、通水条件を変えて6ケース行った。

試験方法は、この装置内の掘削ずり中に雨水を通過させ、通過後の雨水を下部に設置したポリエチレン製のタンクで回収し、環境省が定める方法³⁾により、掘削ずりから雨水に溶出した成分を分析した。ただし、ケース2は雨水を貯留しているため、回収時に貯留状況を確認し、満水状態のときのみ貯留水を回収した。分析項目は、試験前の溶出量試験で検出されたセレン、ホウ素、及びヒ素を対象とした。

表-2 試験ケース一覧表

ケース	ずり層厚 (cm)	ずり粒径 (最大粒径mm)	通水条件	吸着層厚 (cm)	試験開始年月日
1	60	2	通過	無	2009/5/18
2	60	2	貯留	無	2009/5/18
3	60	2	通過	2	2009/6/12
4	60	9.5	通過	無	2009/5/18
5	30	2	通過	無	2009/5/18
6	60	2	通過	6	2009/7/10

(3) 試験期間と浸出水の回収

表-3に試料別の浸出水回収日とその間の降水量を示す。ここで、降水量は、本別のアメダスのデータ⁴⁾を用いた。本試験は暴露開始を2009年5月18日（ケース1、2、4、5）、同年6月12日（ケース3）、同年7月10日（ケース6）の3回に分けて行った。浸出水の回収は、1回あたり累計降水量100mmを目安に行った（月1回程度）。ただし、多量の降雨があった際には、適宜、回収を行った。冬期間（12月～3月）は、試験装置内の水分が凍結するため試験を中断した。試験装置内に水分が入らない様に処理を行い、降水量の累積から除外した。

表-3 回収日と降水量

開放期間		日数	降水量 (mm)	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4	ケース5	ケース6
				開始日①	開始日①	開始日②	開始日①	開始日①	開始日③
H21.5.18	H21.6.12	25	99				○	○	
H21.6.12	H21.6.23	11	112.5				○	○	
H21.6.23	H21.7.10	17	45				○	○	
H21.5.18	H21.7.10	53	256.5	○	○				
H21.6.12	H21.7.25	43	316			○			
H21.7.10	H21.7.25	15	158.5	○	○		○	○	
H21.7.10	H21.8.10	31	218.5						○
H21.7.25	H21.8.10	16	60	○		○	○	○	
H21.8.10	H21.9.15	36	180.5	○	○	○	○	○	○
H21.9.15	H21.10.26	41	105.5	○	○	○	○	○	○
H21.10.26	H21.12.7	42	55	○	○	○	○	○	○
H22.4.14	H22.5.25	41	114.5	○	○	○	○	○	○
H22.5.25	H22.7.7	43	51.5	○	○	○	○	○	○
H22.7.7	H22.8.2	26	95	○	○	○	○	○	○
H22.8.2	H22.8.24	22	130	○	○	○	○	○	○
H22.8.24	H22.9.30	37	86	○	○	○	○	○	○
H22.9.30	H22.10.28	28	68.5	○	○	○	○	○	○
H22.10.28	H22.12.1	34	55	○	○	○	○	○	○

開始日①: H21.5.18試験開始

開始日②: H21.6.12試験開始

開始日③: H21.7.10試験開始

3. 試験結果

(1) 無対策（ケース1、2、4、5）

図-2～7に無対策のケースにおけるヒ素、セレン、ホウ素の累積降水量と溶出量との関係を回収年度ごとに示す。

これらの図より、無対策のケース全てにおいて、溶出量基準値（以下、基準値という）を超過していた。

重金属類の種類別に見ると、ヒ素とセレンはいずれのケースにおいても、試験開始直後が最も溶出量が多く、累積900mm以上経過した後は、溶出量の変化が小さくなった。また、ヒ素については累積降水量400～500mmを境に溶出量が大きく減少（0.14→0.03mg/l）し、その後は0.03～0.05mg/lで推移しているものの、わずかに増加する傾向が見られる。セレンについては若干の変動は見られるものの、累積降水量の増加に伴い、溶出量は減少する傾向が見られる。ホウ素については、累積降水量と溶出量との間に明確な関係が見られなかった。その一方、H21のケース2を除き、夏場に溶出量がピークとなり春と秋の溶出量が少なくなる傾向が見られた。

a) 通水条件と溶出量

通水条件の異なるケース1とケース2を比較すると、ヒ素は試験開始直後には、雨水を一旦貯留するケース2の溶出量が多かった。しかし、時間経過とともにその差は小さくなり、試験開始から累積900mm以上経過した後は、その差は小さいものの拡大する傾向にあった。

セレンは試験開始直後には、雨水を一旦貯留するケース2の溶出量が多かった。しかし、時間経過とともにその差は小さくなり、試験開始から累積900mm以上経過した後は、その差はほとんどなくなった。

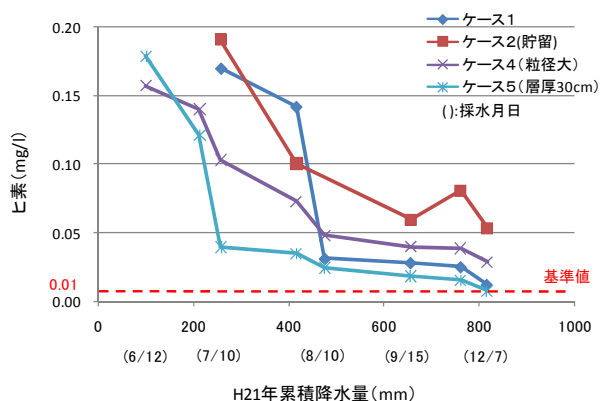


図-2 累積降水量とヒ素溶出量の関係
(吸着層なし H21年)

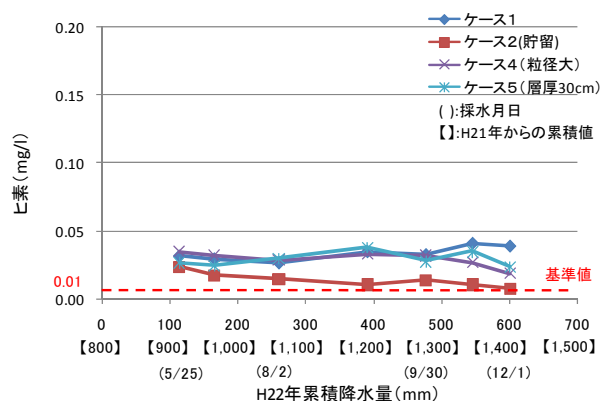


図-3 累積降水量とヒ素溶出量の関係
(吸着層なし H22年)

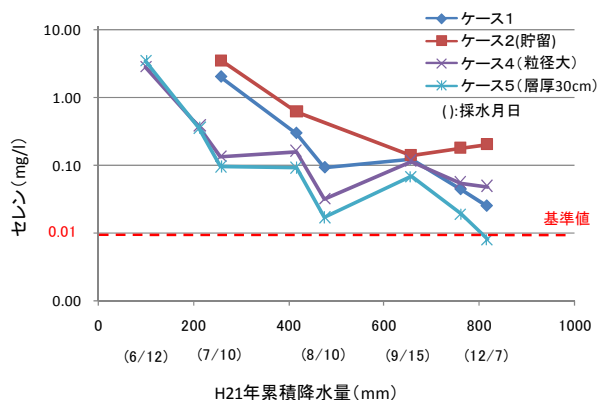


図-4 累積降水量とセレン溶出量の関係
(吸着層なし H21年)

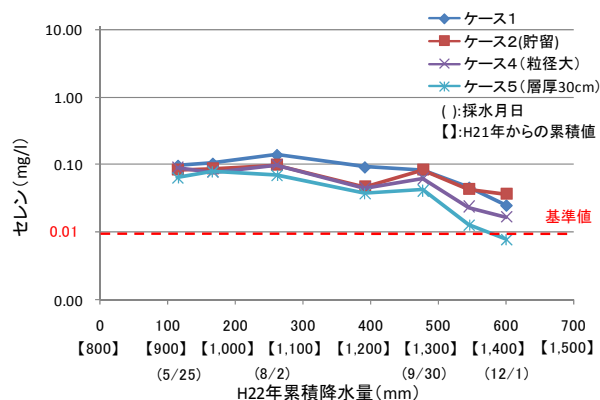


図-5 累積降水量とセレン溶出量の関係
(吸着層なし H22年)

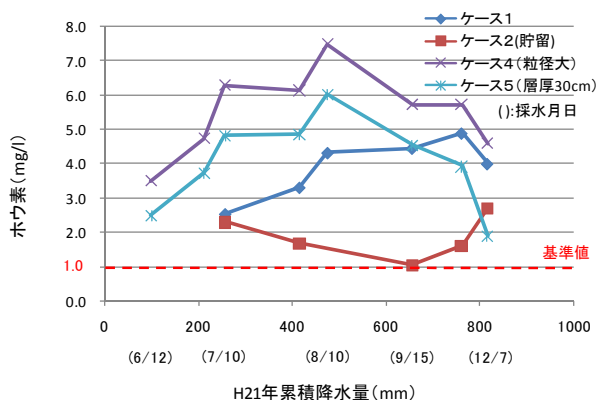


図-6 累積降水量とホウ素溶出量の関係
(吸着層なし H21年)

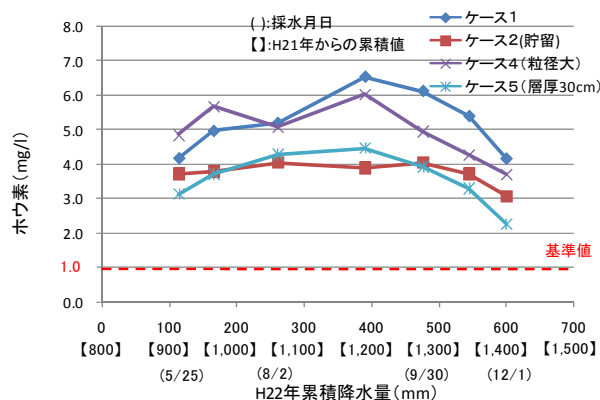


図-7 累積降水量とホウ素溶出量の関係
(吸着層なし H22年)

ホウ素については、試験開始当初から掘削ずり内部を降雨がそのまま通過するケース1の溶出量が多くなった。

b) 掘削ずりの層厚と溶出量

掘削ずりの層厚が異なるケース1とケース5を比較すると、ヒ素は、H21年には掘削ずりの層厚が薄くなると溶出量も小さくなる傾向が見られた。しかしH22年には、層厚と溶出量との間に明確な関係は見られなくなった。

セレンは、ヒ素と同様にH21年には掘削ずりの層厚と溶出量に比例関係が見られた。しかしH22年には、層厚と溶出量との間に明確な関係は見られなくなった。

ホウ素は、H21年の初めには、掘削ずりの層厚が厚いケース1の方が、層厚が薄いケース5よりも溶出量が少なくなっていた。しかしH22年には、層厚が厚いケース1の溶出量が多くなった。

c) 掘削ずりの粒径と溶出量

掘削ずりの粒径が異なるケース1とケース4を比較すると、ヒ素はH21年には粒径の小さいケース1の溶出量が多くなる傾向が見られたが、H22年になると値に全く違いが見られなくなった。

セレンは、ヒ素と同様にH21年には粒径の小さいケー

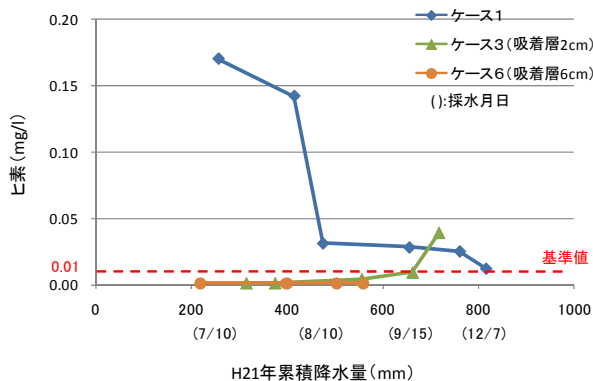


図-8 累積降水量とヒ素溶出量の関係
(吸着層 H21年)

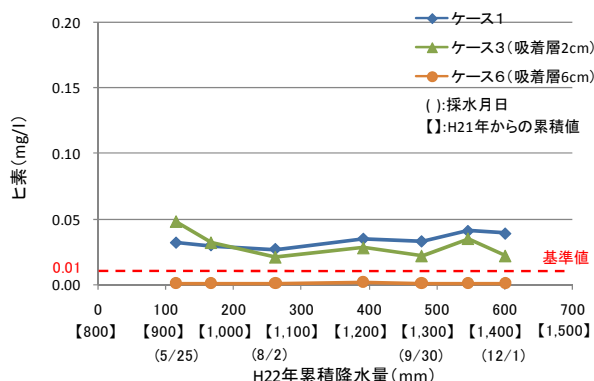


図-9 累積降水量とヒ素溶出量の関係
(吸着層 H22年)

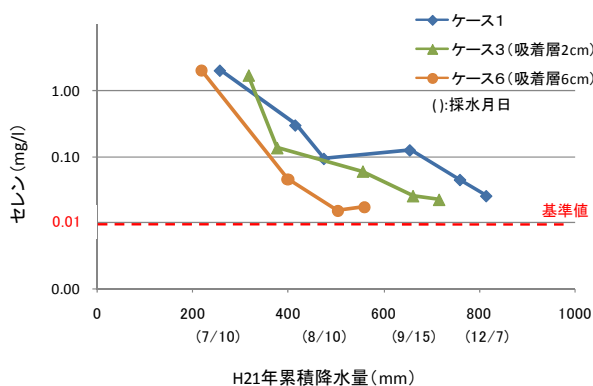


図-10 累積降水量とセレン溶出量の関係
(吸着層 H21年)

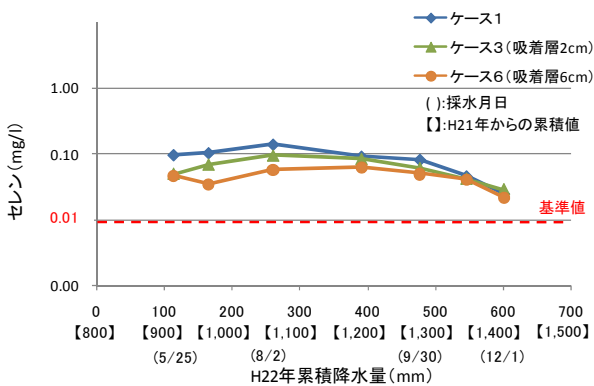


図-11 累積降水量とセレン溶出量の関係
(吸着層 H22年)

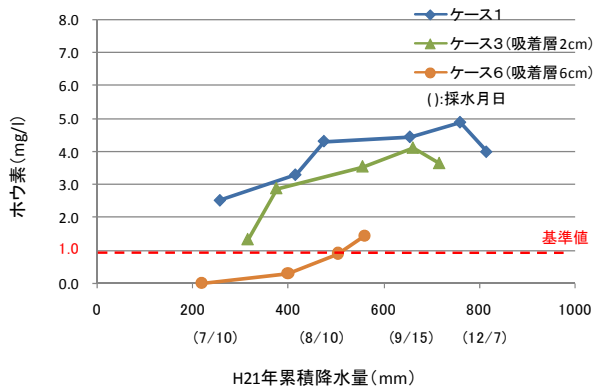


図-12 累積降水量とホウ素溶出量の関係
(吸着層 H21年)

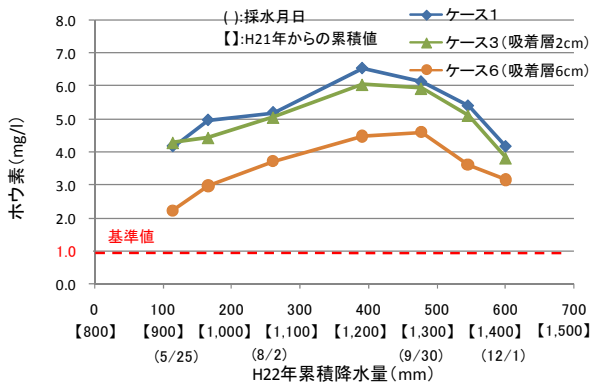


図-13 累積降水量とホウ素溶出量の関係
(吸着層 H22年)

ス1の溶出量が多くなる傾向が見られたが、H22年になると値に全く違いが見られなくなった。

ホウ素については、H21年には粒径の大きいケース4の溶出量が多くなる傾向が認められた。しかしH22年にはヒ素やセレンと同様に、掘削ブリの粒径と溶出量との間には明確な関係は見られなくなった。

(2) 対策(ケース3、6)

図-8~13に対策ケースにおけるヒ素、セレン、ホウ素の累積降水量と溶出量との関係を回収年度ごとに示す。ヒ素では図-8と図-9に示すとおり、H21年では層厚に関

わらず吸着層の効果が見られたが、H22年では吸着層の厚さが2cmの場合には溶出量の低減効果が見られなくなった。

セレンでは、図-10と図-11に示すとおり、H21年ではわずかであるが溶出量の低減効果が見られた。しかしH22年ではその効果も小さくなり、累積降水量1200mm以降は溶出量の差はほとんどなくなった。また、H21年、H22年とも全てのケースにおいて、基準値を超過した。

ホウ素では、図-12と図-13に示すとおり、吸着層の層厚が2cmの場合には、溶出量の低減効果が見られなかったが、6cmの場合には効果が見られた。

4. 考察

(1) 累積降水量と溶出量との関係（無対策のケース）

ヒ素とセレンは、試験開始直後に溶出量が多く、降水量の累積とともに値が減少し、その後はほぼ一定となった。このことからヒ素とセレンに対しては、掘削ずり発生直後の溶出量管理が特に重要であると思われる。また場合によっては、水による洗浄なども対策として有効であると考えられる。

一方、ホウ素は、累積降水量と溶出量との間に明確な関係は見られず、溶出量は春から徐々に上昇し、夏にピークを迎え、秋には再び減少した。このことからホウ素については、特に夏期間の溶出量管理が重要と考えられる。また、累積降水量が増加しても溶出量が変わらないため、発生直後と同様の管理を継続的に実施する必要がある。

(2) 通水条件と溶出量（ケース1、2）

通水条件と溶出量との関係を見ると、ヒ素とセレンについては、H21年では雨水を一旦貯留するケース2の溶出量が多かったが、試験開始から累積900mm以上経過した後には、ほとんど差がなくなった。このことから、湿潤状態である掘削ずりが、これらの物質の溶出を促進しているためと考える。

一方、ホウ素については、試験開始当初から自然降雨で掘削ずり内部を通過させた方が、貯留させてから通過させるよりも溶出量が多くなった。このことは、ホウ素の溶出傾向は、ヒ素やセレンより長い時間を要するためと考える。

(3) 掘削ずりの層厚と溶出量（ケース1、5）

ヒ素とセレンは、H21年には掘削ずりの層厚が厚くなると、溶出量も増加する傾向が見られたが、H22年にはその差がほとんどなくなった。これは、H21年では層厚が厚いほうが、雨水が掘削ずり中を通過する時間が長いので、雨水との接触時間が長くなり、溶出量が増加したものと考える。H22年では、ずり内部のヒ素とセレンが溶出しやすいものから溶出しにくいものが溶出してきたものと考える。

一方、ホウ素は試験開始当初、層厚が薄いケース5の溶出量が、層厚が厚いケース1よりも多くなった。しかし試験開始から累積降水量600mm以上になると、層厚が厚いケース1の溶出量が多くなった。これらのことから、ホウ素は化学的環境の変化により、溶出しやすい存在形態に変化したものと考えられる。

(4) 掘削ずりの粒径と溶出量（ケース1、4）

ヒ素とセレンはH21年には粒径の小さいケース1の溶出量が多くなる傾向が見られたが、H22年になると違いが見られなくなった。これは、H21年では粒径が小さい

ほうが比表面積が大きいため、雨水との接触面積が大きくなり、溶出量が増加したものと考えられる。また、H22年では、ずり内部のヒ素とセレンが溶出しやすいものから溶出しにくいものが溶出してきたものと考えられる。

一方、ホウ素は、試験開始当初、粒径の大きいケース4の溶出量が粒径の小さいケース1よりも多くなった。しかし、試験開始から累積降水量1100mm以上になると、粒径の小さいケース1の溶出量が多くなった。これらのことから、掘削ずりの層厚と溶出量と同様に、ホウ素は化学的環境の変化により、溶出しやすい存在形態に変化したものと考えられる。

(5) 吸着層の効果（ケース3、6）

試験開始当初には、吸着層の効果が顕著に見られたが、その後ヒ素とホウ素の吸着層厚6cmを除き、その効果が見られなくなった。この理由として、吸着層が重金属類で飽和状態となり、これ以上の吸着ができなくなったことによるものと考えられる。

また個々の物質に対する溶出量を見ると、ヒ素は、吸着層厚6cmで基準値未満の溶出量を維持することができた。今後は、さらに継続的に調査を行いその持続性を解析的に検証することが必要である。セレンにおいて吸着層による対策を進めるためには、更に厚い吸着層で試験調査を行うか、吸着層を異なる試料に交換した場合の効果検証が必要と考える。ホウ素は、6cmよりも厚い吸着層の効果を検証する試験が必要と考える。

5. まとめと今後の課題

本報告では、昨年度より実施している屋外カラム試験について、降雨傾向の違いが溶出量に与える影響、及び現場付近で採取した火山灰による重金属類の吸着効果について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- ・ヒ素、セレンは、ホウ素より溶出速度が早く、溶出しやすい傾向があり、ホウ素は、夏期間に溶出量が大きくなる傾向がある。
- ・重金属の溶出濃度は、雨水との接触面積や接触時間の増加により促進される傾向が見られた。
- ・吸着層を設置することにより、重金属の種類に差があるものの溶出濃度は低減され、特にヒ素に対して有効である。

今後の課題として、ホウ素の溶出傾向は、粒度や層厚に対して、ヒ素やセレンのような明確な関係が見られなかったため、環境変化に伴う内部状態の変化について、さらに検討を続けていきたいと考える。

本報告は、国立大学法人北海道大学大学院工学研究科およびパシフィックコンサルタンツ株式会社との共同研究「自然由来の重金属を含む岩石からの溶出水処理対策工に関する研究」の成果の一部である。

最後に、本試験の実施にご協力いただいた関係各位に記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木研究所寒地土木研究所防災地質チーム：トンネル建設における地質的課題（3）～トンネル建設で発生する切削ズリ中の自然由来重金属類の評価・対策～、寒地土木研究所月報、No. 674、pp. 47～52、2009. 6.
- 2) 渡邊崇史、田本修一、深谷弘明：岩石中に含まれる自然由来重金属類の長期溶出傾向について、第 53 回北海道開発技術研究発表会（HP）、環 36（道）、2010. 2.
- 3) 環境省ホームページ土壌汚染対策法に基づく告示：
<http://www.env.go.jp/water/dojo/law/kokuji.html>
- 4) 気象庁ホームページ：
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>