

2000年有珠山火山噴出物からの砒素の溶出 Arsenic leaching from ash fall and mudflow deposits of the 2000 Usu eruption, northern Japan

八幡正弘・荻野 激・亀海泰子*

Masahiro Yahata, Tagiru Ogino and Yasuko I. Kamegai*

キーワード：砒素, 重金属溶出, 粘土鉱物, 降下火砕堆積物, 火山ガス, 有珠火山

Keywords: Arsenic, Metal leaching, Clay mineral, Ash fall deposit, Volcanic gas, Usu volcano

I はじめに

北海道南部の洞爺カルデラ(洞爺湖)南西部(第1図)に位置する有珠山において2000年3月31日に23年ぶりに噴火活動が開始した。3月31日以来のマグマ水蒸気爆発～水蒸気爆発により, 地下に伏在する中新統～更新統の火山岩類の破砕物を多く含む火山噴出物が大量に地表にもたらされた。その多くは降下火山灰(降下火砕堆積物)として堆積し, 一部は熱泥流として火口周辺へと流出した。これらの噴出物は主に変質した岩石の破砕物から構成され, とくに微細な粘土粒子を多く含む。今回, これらの噴出物からの重金属の溶出について検討を行った結果, 火山ガス起源と推定される砒素(As)の溶出が認められ, 一部の値は「土壤の環境汚染に係る環境基準 [平成3環告46]: 以下, 土壤の環境基準と略記」を越えた。以下に, 噴出物の特徴とAsの溶出について報告する。

II 経過

2000年有珠山火山噴出物を構成する粒子のうち, 石質岩片が占める割合は3月31日の噴出物で50-60%(構成粒子比), 4月1日以降の噴出物で90%以上であった。しかも硫化鉱物を含む変質した石質岩片(新第三系～下部更新統起源の火山岩類)が占める割合は前者で30-40%, 後者で50-60%であった。これらの火山噴出物の粒径は全般に微細で, 20 μ m以下の粒子, とくに粘土粒子を多く含む特徴がある。これらのデータの概要は4月中旬にすでに地質研究所として公表した(有珠山部会と地質研究所ホームページ, 4月14日)。

一方, 火山灰の処分については, 噴火間もない4月4日付けで北海道環境生活部環境室廃棄物対策課長名で「...発生した火山灰については, 粉状, 泥状などの性状に関わらず, 土砂として取り扱って差し支えありません...復旧作業等により除去した火山灰の堆積・保管又は処分に当たっては, 周辺環境に支障を与えることがないように配慮した上で...」との通達が出された。

また, 4月中旬には除去された火山灰の処分と利用法についても「砂利採取場への埋め戻しに使用して差し支えないか」(経済部, 4月12月)との問い合わせもあり, 「微細粒子が多いことから周辺地下水を懸濁させるなどの影響が及ぶ可能性が高い」としてそのような処分方法は控えるべきであるとの回答を行った。

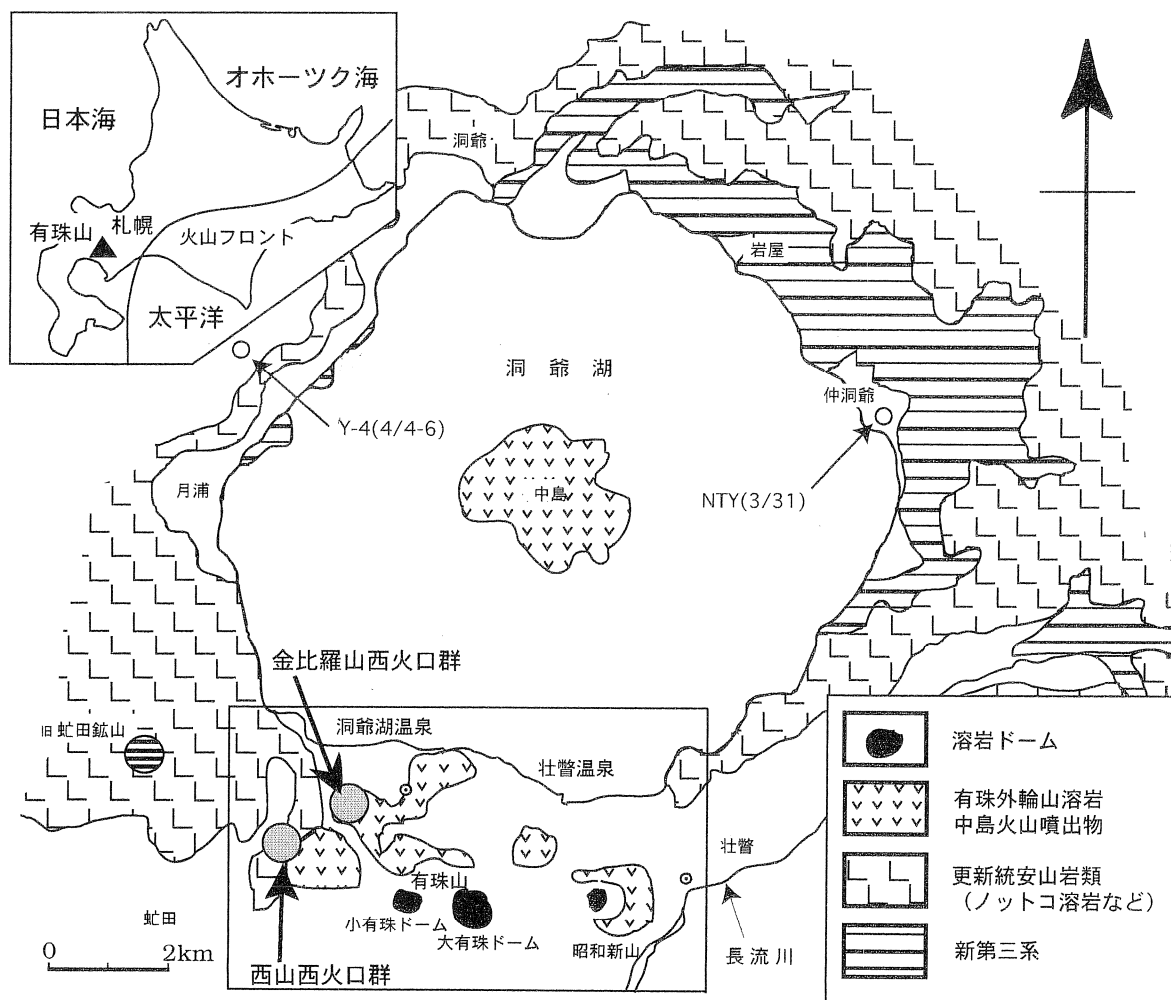
このような中で4月下旬, 一部の地区で火山灰の除去が開始された。地質研究所としては火山灰の環境に与える影響についての検討を急ぐこととし, これら硫化鉱物を含む火山噴出物が地表の酸化的な環境において重金属を溶出する可能性について検討を行った。その結果, Asの溶出量が「土壤の環境基準」を越えることが明らかとなった。なお, このAsの起源については, 後述するように, 当初懸念していた硫化鉱物由来よりも火山ガス由来が多いと判断した。

上記の検討と分析は, 4月中旬に開始し, 最初の溶出試験の結果は4月28日に明らかとなった。この結果を, 同日, 有珠山現地合同対策本部で火山灰の除去を担当している室蘭土木現業所に連絡し, 追加の調査と対策についての検討を急ぐべきであることを指摘した。室蘭土木現業所では当初, 火山灰の処分は建設用の盛土材としての活用を検討していたが, これを取り止め, 5月初旬から火山灰からのAsの溶出に関する調査・検討を開始した。同時に, このことは室蘭土木現業所から国と関係する市町に連絡され, 連絡協議会のもとで報告された。その中で, とくに対応の必要な国および虻田町が独自に調査と対策の検討に入った。

なお, 除去された火山灰は長流川の河川敷(地下水および河川水の及ばない範囲)と洞爺湖温泉街西部の旧学校グラウンドに仮置されている。

III 2000年有珠山火山噴火の概要

今回の噴火活動は, 有珠山北西～西方の山西西火口群と金比羅山西火口群とで進行し(第2図), 前者では3月31日から, 後者では4月1日から噴火が開始した。噴煙は風の影響を受け, 火口群から東～北東～南東方向に流された。



第1図 洞爺カルデラ周辺の地質概略図

地質図は八幡(1992), 太田(1956), 曾屋ほか(1981)にもとづく。

Fig. 1 Simplified geological map of the Toya caldera (after Yahata (1992), Ota (1956) and Soya et al. (1981)).

3月31日に最初の噴火活動が始まった西山西火口群は国道230号線およびその東側山麓斜面, 西側丘陵地や町道付近に位置する。この火口群からもたらされた火山噴出物は多数の噴石を含む粗粒な降下火砕堆積物や粘土粒子を多く含む“泥状”の降下火砕堆積物からなり, 一部の火口からは熱泥流(層厚約1.5m)が溢流し, 国道230号線へ流下した。西山西火口群周辺ではドーム隆起が進行し, ドーム北側では凹地が形成され, 新たな池が誕生した。

一方, 4月1日に噴火活動が開始した金比羅山西火口群は洞爺湖温泉街の南西側の金比羅山西山麓に位置し, 噴出物は温泉街およびその周辺に広く堆積した。その層厚は3~5 cmである。なお, 火口のごく近くでは降下火砕堆積物の層厚は数m~10mに達する。また, 金比羅山西火口群から溢流した熱泥流は流路溝である西山川に沿って流下し, 2つの橋を破壊しながら西山川から溢れて, 温泉街に流出し, 建造物を破壊した。この熱泥流は, 目視観測にもとづけば, 地下水が熱せられ, かつ, 火山ガスによる“ガスリフト”によって地下水面上昇し, 火口から溢流した熱水が火口周辺

に堆積した火山灰を巻き込んで流下したものと判断される。

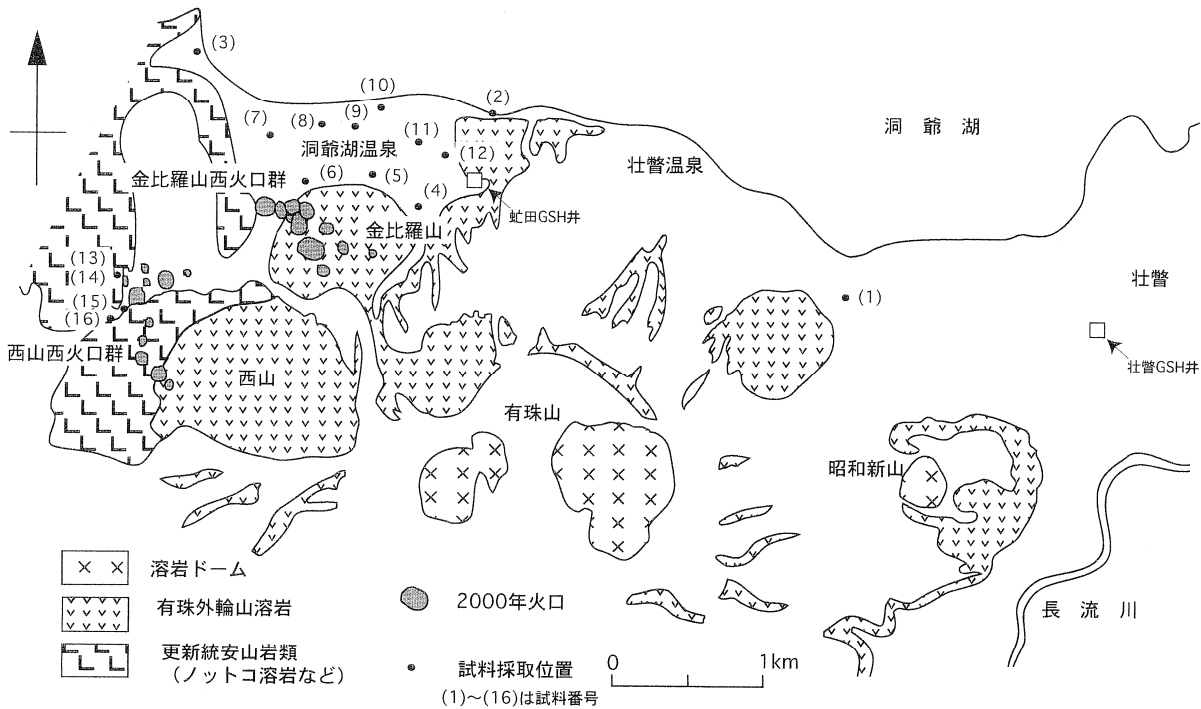
2つの火口群から半径1.5km範囲内の火山噴出物の体積は降下火砕堆積物で約20万m³, 泥流堆積物で約10万m³と推計される(暫定値)。ただし, 火口にごく近い地区での堆積量の推計によっては, さらに数値は増えるものと予想される。

IV 火山噴出物とその特徴

IV. 1 火山噴出物の構成粒子

今回の噴火活動によりもたらされた火山噴出物は, 前述のとおり降下火砕堆積物と泥流堆積物からなる。

火口周辺では, 噴火活動の初期に噴石を伴う粗粒な噴出物が堆積したが, 噴火活動が弱まるにつれ, 火口周辺でも細粒な噴出物が堆積した。火口から離れた地域では全般に細粒な噴出物からなり, 空中での淘汰により, 火口から遠方で, 粒径が小さくなる傾向が顕著である。



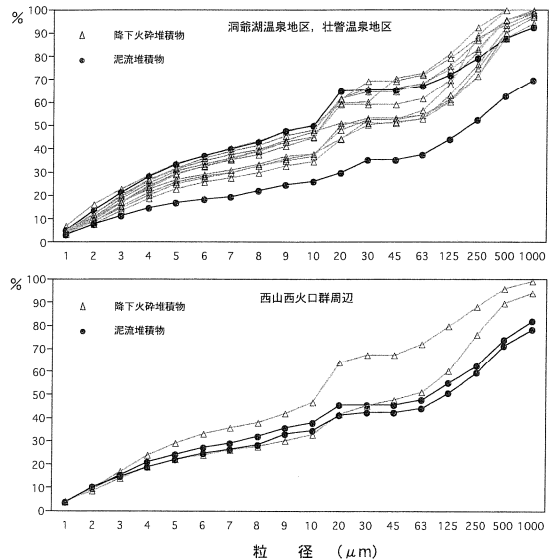
第2図 有珠山付近の地質概略図と2000年火口
地質図は八幡(1992), 曾屋ほか(1981)にもとづく。

Fig. 2 Simplified geological map of Usu volcano (after Yahata (1992) and Soya et al. (1981)).

噴出物の粒度分布を湿式篩(0.045mm以上)と光透過型粒度分析器(堀場製CAPA-300)で測定した。その結果、火口から500m以上離れた地区での降下火砕堆積物は、そのほとんどは1mm以下の粒子から構成され、とくに0.045mm以下の粒子が47-71%占めており、0.02mm以下の粒子が20-50%以上含まれている(第3図)。さらに、火口から数km~10km離れた地域で雪の上に堆積した火山灰(第1図のNTYとY-4)の粒径は、0.25mmまたは0.125mm以下で、とくに0.045mm以下の粒子(特に0.02mm以下)が多く含まれる。

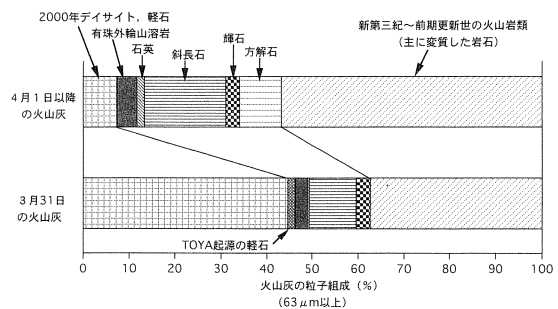
一方、噴出物はガラス質デイサイトや軽石からなる本質物質と石質岩片からなる。本質物質は3月31日の最初の噴火による降下火砕堆積物中に40-50%含まれているが、それ以降の堆積物中には10~数%程度(その多くは再堆積による)が含まれているに過ぎない。したがって、今回の噴出物の多くは石質岩片から構成されているという特徴がある(第4図)。

石質岩片は、粘土化した凝灰岩や安山岩、珪化した石英安山岩~流紋岩質な岩石、有珠外輪山溶岩起源の玄武岩や安山岩などからなる。粘土化した凝灰岩や安山岩は主にスメクタイトを多く含み、方解石や黄鉄鉱を伴う。珪化した石英安山岩~流紋岩質な岩石は石英-セリサイト-緑泥石-緑レン石からなる。X線回折においても、石英、斜長石の他、スメクタイト、カオリナイト、(緑泥石)、方解石、黄鉄鉱、沸石などが認められ、細粒の試料ほどスメクタイト含有量が多い(第5図)。これらの石質岩片を火口近傍で1985年に掘削されたボーリング(虻田GSH井)地質との比較から、その起



第3図 2000年有珠山噴火の降下火砕堆積物と泥流堆積物の粒度分布

Fig. 3 Particle size frequency distribution of ash fall and mudflow deposits of the 2000 Usu eruption.



第4図 2000年有珠山噴火の降下火砕堆積物の石質岩片組成
Fig. 4 Lithic fragment composition of ash fall deposit of the Usu 2000 eruption.

第1表 As含有量, As溶出量, SO₄²⁻溶出量, Cl⁻溶出量およびpHTable 1 As concentration, and As, SO₄²⁻ and Cl⁻ leaching concentration of ash fall and mudflow deposits, and pH in their solution.

	As含有量 ppm	その他の金属 元素の溶出量 mg/l	As溶出量(H ₂ O) ¹⁾		pH		SO ₄ ²⁻				Cl ⁻		
			mg/l	mmol/kg	H ₂ O処理 ³⁾	H ₂ O ₂ 処理 ⁴⁾	H ₂ O処理 ³⁾	H ₂ O ₂ 処理 ⁴⁾	TS ⁵⁾ -SO ₄ ²⁻	H ₂ O処理 ¹⁾	H ₂ O処理 ¹⁾	mmol/kg	
1) S-2	< 1.0	Pb <0.005 ²⁾ Zn 0.008 ²⁾ Cu 0.005 ²⁾ Cd <0.001 ²⁾ S ²⁻ 0.06 ²⁾	0.008 0.020 ²⁾	0.001	7.3 7.9 ⁶⁾	6.0 7.4 ⁷⁾	2.8 164 ⁶⁾	5.6	1282.1 229 ⁷⁾	241.3	235.7	0.31 1.69	1.69
2) Soubetsu-5	4.7		0.036	0.005	7.5	3.5	2.8	5.7	1295.1	256.8	251.1	0.70	3.85
3) Tsukiura-2			< 0.005	0.000									
4) Kampo			0.013	0.002									
5) Kousu-bashi			0.007	0.001	7.5	3.2	13.8	27.1	1286.1	249.1	222.0	1.45	7.69
6) Md-2			< 0.005	0.000	7.4	3.4	26.1	52.2	1241.5	236.7	184.5	4.30	23.26
7) TON-2	2.0		< 0.005	0.000	7.6	5.2	11.9	24.0	1264.6	259.9	235.9	1.05	5.75
8) TON-5	< 1.0		0.008	0.001	7.5	5.6	12.1	24.0	> 1500	>300		1.85	9.96
9) TON-13	3.9		0.013	0.002	7.5	4.2	4.7	9.5	1301.4	255.3	245.8	1.45	8.04
10) TOA-4			0.011	0.001									
11) TOA-5	3.9		0.008	0.001	7.5	3.8	12.9	25.2	1202.7	246.1	220.9	0.75	3.97
12) TOA-10			0.032	0.004									
13) NS-5	6.6		< 0.005	0.000	6.9	2.4	36.5	75.3	690.0	130.2	54.9	2.10	11.75
14) NS-6			n.d.	n.d.									
15) NS-12-2	7.6		0.033	0.004	7.5	3.4	5.2	10.2	1303.6	263.9	253.7	2.20	11.84
16) NS-14-1	7.8		0.023	0.003	6.8	3.0	4.2	8.2	652.8	125.7	117.5	1.55	8.26
17) NTY(< 0.045mm)	As 8.8, Zn 125, Cu 71.4												
18) Y-4 (< 0.045mm)	As 17.6, Zn 104, Cu 90.3												

¹⁾ のAs溶出試験では ²⁾を除いて, 試料5gに対し, 溶媒50mlを混合し, 6時間振とう(振とう幅約3.5cm, 振とう回数約200回/分)。

²⁾ の溶出試験は, 試料50gに対し, 溶媒500mlを混合し, 6時間連続振とう(振とう幅4-5cm, 振とう回数約200回/分)。

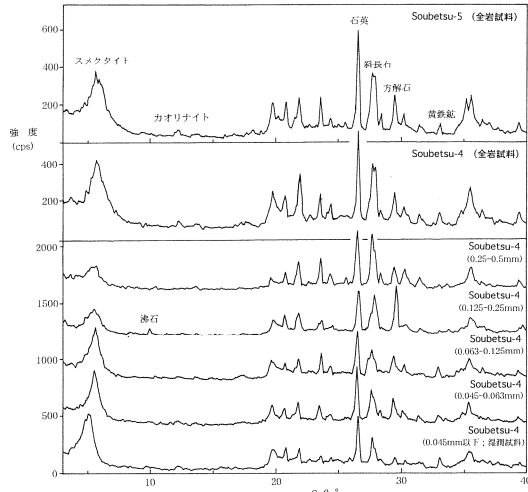
³⁾ のH₂O処理でのpH測定とSO₄²⁻の測定では, ⁶⁾を除いて, 試料0.5gに対し, 溶媒100ml。

⁴⁾ のH₂O₂処理でのpH測定とSO₄²⁻の測定では, ⁷⁾を除いて, 試料1gに対し, 溶媒20ml。なお, H₂O₂処理は, H₂O₂に水酸化ナトリウムを加え, pHを5.2に調整し, 湯煎上で急激な反応がなくなった後(約5~10分後), 放冷し, pHを測定。

⁵⁾ のTSは, H₂O₂処理後のSO₄²⁻の値 (mmol/kg)。

⁶⁾ のH₂O₂処理でのpH測定では, 試料50gに対し, 溶媒500ml。

⁷⁾ のH₂O₂処理でのpHの測定とSO₄²⁻の測定では, 試料50gに対し, 溶媒500ml。なお, H₂O₂処理方法は, H₂O₂にアンモニア水を加え, pHを6に調整し, ホットプレート上(約80℃)で, 反応がおさまるまで約1日間静置, 放冷後, pHを測定。



第5図 2000年有珠山噴火の降下火砕堆積物のX線回折図
試料Soubetsu-4と-5は近接した位置で採取。
Soubetsu-5については全岩試料のみについて、
Soubetsu-4については全岩試料と各粒度毎に区分
した試料についてX線回折を行った。なお、0.045
mm以下の試料については湿潤状態で分析したた
め、15Åのピークが17Åに移動しており、スメク
タイトの存在を示している。

Fig. 5 X-ray diffraction patterns of selected ash fall
deposit samples of the Usu 2000 eruption.

源を求めると、①スメクタイト-方解石の多い凝灰岩はボーリング深度160m-380mの柳原層(鮮新-更新統)に、②スメクタイト-方解石の多い安山岩は深度80m-160mのノットコ溶岩(更新統)に、③珪化した岩石(石英-セリサイト)は、深度380m以深の中新統(荘珠内川層や長流川層)に由来すると判断される。また、2つの火口群からもたらされた粘土粒子の組成は、西山火口群付近の試料でスメクタイト-カオリナイトが、金比羅山西火口群の近傍の試料でスメクタイトが主であった。

IV. 2 火山噴出物と地下地質構成物の重金属含有量

以上のように、今回の火山噴出物には黄鉄鉱を含む基盤の変質岩の破砕物が多く含まれる。これらの変質岩がAs溶出の原因となった可能性もあるため、今回の火山噴出物と地下に伏在する基盤変質岩中のAs含有量について検討した。

今回の降下火砕堆積物のうち火口から4km以内に堆積した噴出物中のAsの含有量は、2試料を除いて2.0-7.8ppmであった。また、火口から数km離れた地区に堆積した降下火砕堆積物(NTYとY-4)のうち、0.045mm以下の粒子のAs含有量は、試料NTYが8.8ppm、試料Y-4が17.6ppmであった(第1表)。

一方、基盤岩中に含まれる重金属の含有量については、洞爺湖温泉街と壮瞥町滝の町地区で実施されたボーリング試料(虻田GSH井、壮瞥GSH井)を用いて決定した。その結果、虻田GSH井では、As含有量は有珠外輪山溶岩で3.2-4.7(平均3.9)ppm、ノットコ溶岩で2.9

第2表 虻田GSH井と壮瞥GSH井の各層毎の地質・変質概要とAs含有量

Table 2 Characteristics of lithofacies and alteration, and As concentration of main stratas in the drill cores and cuttings, Abuta-GSH and Soubetsu-GSH.

地層名	岩相	As含有量(平均値)(ppm)	
		虻田GSH井	壮瞥GSH井
有珠外輪山溶岩	玄武岩質火山噴出物	3.2-4.7 (3.9)	
ノットコ溶岩	粘土化した安山岩溶岩 (スメクタイト-方解石-黄鉄鉱)	2.9-8.4 (5.6)	
柳原層	粘土化した凝灰岩 (スメクタイト-方解石-黄鉄鉱)	2.7-9.2 (5.4)	
荘珠内川層	変質の著しい石英安山岩質火山噴出物 (石英-セリサイト-緑泥石-アルバイト- 方解石-黄鉄鉱)	3.5-48.6 (14.9)	4.0-20.8 (25.1)
長流川層	変質の著しい石英安山岩質火山噴出物 (石英-セリサイト-緑泥石-アルバイト- 方解石-黄鉄鉱)	1.9-34.2 (8.5)	12.2-36.0 (25.8)

-8.4(平均5.6)ppm、柳原層で2.7-9.2(平均5.4)ppm、荘珠内川層で3.5-48.6(平均14.9)ppm、長流川層で1.9-34.2(平均8.5)ppmであった。また、壮瞥GSH井では、As含有量は荘珠内川層で4.0-208(平均25.1)ppm、長流川層で12.2-36.0(平均25.8)ppmであった(第2表、付図1, 2)。このように降下火砕堆積物中のAs含有量は基盤の岩石中のそれとほぼ同程度の値で、岩石中の平均的な砒素含有量(0.8-13.0ppm; Faure, 1998)比して、著しく多い値とは言えない。

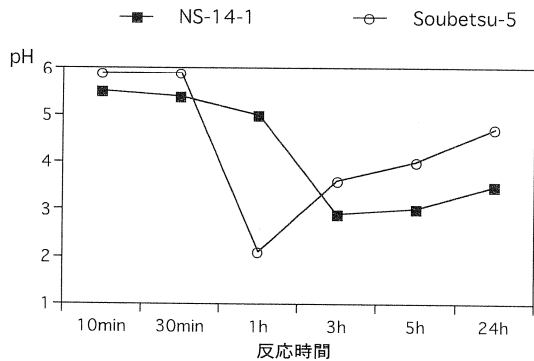
また、これらのボーリング試料中のAs以外の元素のうち、K, Na, Ca, Feは、母岩の性質と同時に変質鉱物との相関が顕著であり、セリサイト(イライト)、緑泥石、アルバイトなどの変質鉱物の生成量に規制されていると推定される。さらに、Cu, Pb, Znは荘珠内川層、長流川層中の硫化鉱物の多い部分で多く含有されている。HgとAsは荘珠内川層上部のスメクタイトや混合層鉱物が卓越する部分で多く含まれる傾向にある。

V 火山噴出物からの重金属の溶出

火山噴出物からの重金属の溶出試験は前述の「土壌の環境基準」の測定方法に準拠して行ったが、使用する振とう機の違いにより、a, bの2つの方法で行った。aは振とう幅を4-5cm、振とう回数約200回/分(試料50gに対し溶媒500ml)、他の方法は振とう幅を約3.5cm、振とう回数約200回/分(試料5gに対し溶媒50ml)である。

aの方法では試料S-2について、As, Pb, Zn, Cu, Cd, S²⁻の溶出試験を行った。bの方法では試料S-2を含めたすべての試料に対しAsの溶出試験を行った。なお、Asの溶出量をmg/lで表した他に、単位試料量の溶出量としてmmol/kgでも表示した。

火山噴出物からのAsの溶出量は、試験試料の半数で土壌の環境基準の0.010mg/lを越え、最大で0.036mg/lであった。なお、S-2について異なる2つの振とう方法で行った結果、溶出量が0.020mg/lと0.008mg/lと異なる値が得られた。これは方法の違いよりも試料の



第6図 過酸化水素水との反応による反応時間とpHの関係 (室温; 約24°C)

Fig. 6 Relationship of pH and the time elapsed in H₂O₂ solution.

不均一性によるものと判断している。また、S-2について行ったPb, Zn, Cu, Cdの溶出量はそれぞれ< 0.005mg/l, 0.008mg/l, 0.005mg/l, <0.001mg/lで、いずれも土壌の環境基準値以下であった(第1表)。

一方、溶出試験を行った試料について、蒸留水中、および過酸化水素による強制酸化後のpHとSO₄²⁻の溶出量について検討を行った。なお、過酸化水素処理後のpHの測定については、ア、イの2つの方法で行った。アの方法は、過酸化水素水にアンモニア水を加え、pH 6に調整し、火山灰1に対し溶液10を加え、ホットプレート上(約80°C)で反応がなくなるまで約1日静置し、放冷後pHを測定する(土壌および作物栄養の診断基準: 佐々木の方法)。イの方法は、過酸化水素水に水酸化ナトリウム(0.1mol)を加え、pH5.2に調整し、火山灰1に対し溶液20を加え、湯煎上で、急激な反応がなくなった後(約5-10分後)、放冷しpHを測定する(土壌環境分析法(日本土壌肥料学会監修; 博友社)による過酸化水素水による方法: 村上の方法)。

アの方法では、試料S-2についてのみ行い、イの方法では全試料について行った。その結果、蒸留水中でのpHは6.8-7.9であるのに対し、過酸化水素処理後のpHは2.4-7.4と低い値を示した(第1表)。

また、上記2つの方法で行った過酸化水素水処理後のpHの値に若干の違いが認められたので、過酸化水素水による処理の過程での反応時間とpHの関係について

検討を行った。なお、この試験は室温(24°C)で行った。その結果、反応開始から30分間はpH5.4-5.9であったが、反応が進むにつれ、pHが2-3に下がり、反応が減衰、または終了すると、次第にpHが3.5-4.7(24時間後)まで上昇することが明らかとなった(第6図)。すなわち、反応の初期には酸化に伴う硫酸の生成によりpHが急に下がるが、時間とともに火山灰中の方解石(10~数%)との反応が進行し、pHが上昇したと判断される。

一方、SO₄²⁻溶出量は蒸留水処理後の値に対し、過酸化水素水処理後の値が非常に大きく、試料の単位重量当たりのmmol数で算出すると、両者の差は54.9-253.7 mmol/kgとなった(第1表, 第7図)。このことは今回の火山噴出物は酸化によりSO₄²⁻を多量に溶出するという特徴を有していることを示している。

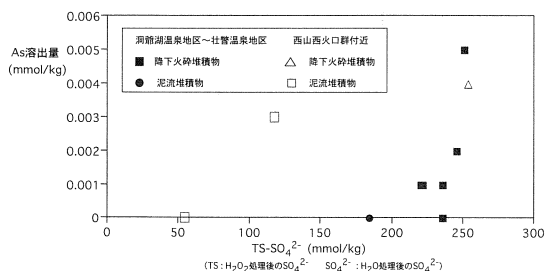
VI 考察

以上のように、2000年有珠山火山噴出物の一部から、「土壌の環境基準」を越えるAsの溶出が認められた。噴火直後の噴出物からのAsの溶出は、石質岩片起源と火山ガス起源が考えられ、以下に、それぞれについて考察する。一般に、変質した岩石からのAsの溶出は、砒素鉱物や硫化砒物が酸化条件下で分解したり、一旦、Feと共沈したAsが再び遊離するなどして発生する。

今回の火山噴出物中の石質岩片を構成する変質した火山岩片は、地下に伏在する新第三紀~前期更新世の火山岩類の破砕物である。地下に伏在するこれらの火山岩類は黄鉄砒などの硫化砒物を含むものの砒素鉱物は確認されず、As含有量も平均で8-26ppmと、一般の岩石中の砒素含有量の平均値と大きな差はない。また、今回の火山噴出物中のAs含有量も2-18ppmと、上記の基盤岩中の砒素含有量に近い値である。

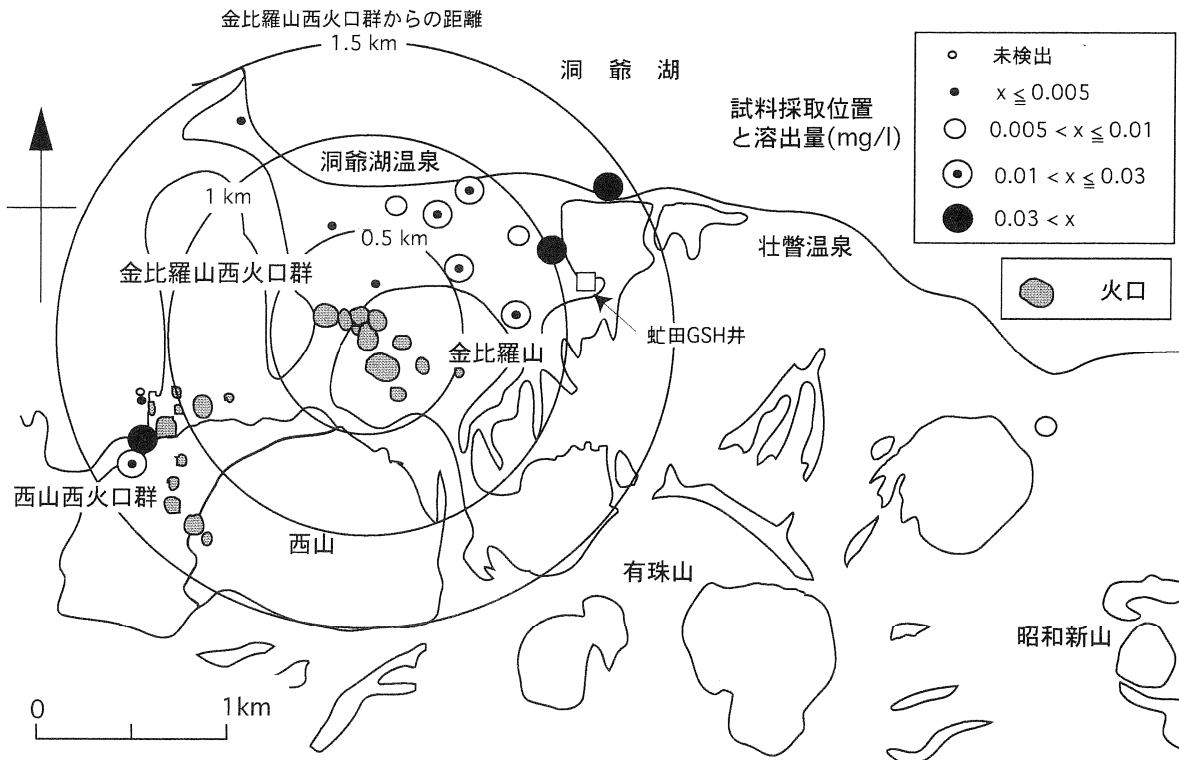
一方、仮にこれらの石質岩片中のAsが溶出しているとすれば、その溶出条件が問題となるが、前述の実験結果から、火山噴出物は酸化条件下でもSO₄²⁻の急増により一時的にはpHが低下しても、内部に含まれる方解石との反応によりpHの上昇が生じる。従って、岩片中のAsなどの重金属(硫化砒物など)は酸化条件下で一時的に溶出しても、pHの上昇に伴って溶出量は次第に減少するか、あるいはFeとの共沈が進むと予想される。

次に、火山ガス起源のAsについて考察する。今回の火山噴出物中でAsの溶出量が多い試料は金比羅山西火口群の北~北東側での試料では火口から北東600m~1km以上離れた地区である(第8図)。たとえば、金比羅山西火口群の北側300mでの堆積物ではAs溶出量は0.005mg/l以下であったのに対し、北東側600m以上離れた地区では0.03mg/lを越える。この原因として火口から遠ざかるにつれて、降下火砕堆積物の粒径が小さくなることと関係している可能性がある。そこで降下火砕堆積物



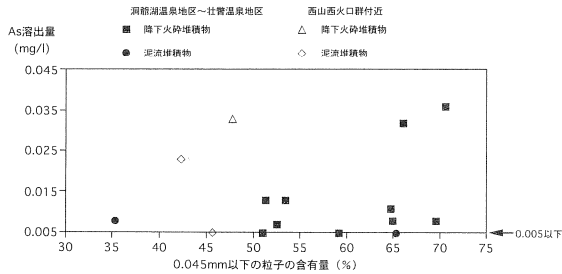
第7図 As溶出量とTS-SO₄²⁻の関係

Fig. 7 Relationship of As leaching concentration and TS-SO₄²⁻ of ash fall and mudflow deposits.



第8図 As溶出試験試料位置と溶出量

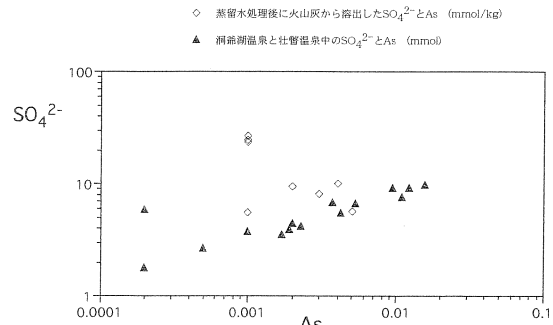
Fig. 8 Sample location of As leaching test and As leaching concentration.



第9図 As溶出量と粒度組成

Fig. 9 Relationship of As leaching concentration and particle size of ash fall and mudflow deposits.

の粒度とAsの溶出量の関係について、0.045mm以下の粒子の含有量との比較を試みた。その結果、火口から遠ざかるにつれて火山灰中の微細な粒子(たとえば、0.045mm以下)の量が増えるにつれ、Asの溶出量が多くなる場合と、必ずしもそのような相関が認められない場合がある(第9図)。また、西山西火口群周辺に堆積した降下火砕堆積物は0.045mm以下の粒子の含有量が42-47%であるが、As溶出量は0.02mg/lを越える。従って、粒径とAs溶出量との関係は、さらに微細な粒子により規制されているか、あるいは他の要因があるのか、検討する必要がある。仮に、火山ガスに起源をもつAsが噴火活動によって微細粒子表面に付着したと考えるならば、他の元素も同様の挙動を示すはずである。たとえば、前述のように蒸留水中での SO_4^{2-} 溶出量に対して、過酸化水素による強制酸化後の SO_4^{2-} 溶出量が多い点は、硫化鉱物の溶解に伴う以外に、火山噴出



第10図 火山噴出物から溶出した SO_4^{2-} , Cl^- , As, および洞爺湖温泉と壮瞥温泉の温泉水中の SO_4^{2-} , Cl^- , Asの関係

Fig. 10 Relationship of leached SO_4^{2-} , Cl^- , As from ash fall and mudflow deposits, and SO_4^{2-} , Cl^- , As in hot water of Toya and Soubetsu hot springs.

物粒子の表面に付着していた火山ガス起源の元素、たとえば、 H_2S , SO_2 などの酸化によっても説明される。平林ほか(2000)によれば、2000年有珠山火山活動に伴う

火山ガスの分析から, ①SO₂の放出量は数~11ton/dayで, 6月中旬にピークを迎えた, ②火山灰に付着した水溶性のCl⁻とSO₄²⁻は1977年の火山灰に比し, 1桁多いことを明らかにし, 降下火砕堆積物を構成する微細な粒子表面に火山ガス起源物質が多く付着していることを示唆している。

一般に, 火山ガス中のAsは, 亜砒酸 [As(OH)₃] の形で気相に入り, 地下水との反応や蒸気の凝集に伴って気相から除かれる (Nicholson, 1993). Mambo *et al.* (1991) や Mambo & Yoshida (1993) によれば, 火山ガス中のAsは高温 (たとえば, 300°C以上) の状態では高濃度で, かつ, 噴火活動に伴って気化し, 空中に飛散するが, 低温側においては地下水への溶解, 周辺岩石中への沈澱などが行われるとしている。また, 洞爺湖温泉は地下水中に深部からの火山ガスが抽入することによって形成された温水を温泉として採水している (秋田・早川, 1988)。この温泉水中には0.074-0.315ppmの砒素が含まれており (和田ほか, 1988), 上記の火山ガス起源のAsが低温側で地下水中に溶解している例と言える。

第10図に火山噴出物から蒸留水中に溶出したSO₄²⁻, Cl⁻, Asと, 洞爺湖温泉と牡警温泉の温泉水中のSO₄²⁻, Cl⁻, Asの関係について示した。この図から明らかなように温泉水中のSO₄²⁻とAsの関係およびCl⁻/SO₄²⁻とAsの関係は火山噴出物から溶出したそれらと非常によく相関がある。このことは今回の火山噴出物から溶出したAsやSO₄²⁻の多くは火山ガス起源であることを示している。

今回の有珠山の噴火活動ではとくに水蒸気爆発が主体で, かつその噴出物も粘土粒子を多く含んでいたことから, 火山ガス中のAsが水分を多く含んだ微細な火山灰粒子 (粘土粒子) に付着したと判断される。

VII あとがき

地下水中の砒素汚染は, 世界各地で多くの健康被害を発生させている (地学教育と科学運動特別号編集委員会編, 1997; 日本地質学会環境地質研究委員会編, 1998)。国内においては1993年に砒素に係る地下水質評価基準地が0.01mg/l (地下水質環境基準と同じ値) に強化され, これにより国内各地の地下水中に基準を越えるAs含有量が確認された (中島, 1997)。また, 公共用水地域 (河川など) においても高いAs含有量の河川水が認められ, たとえば, 洞爺湖に近い長流川では観測点によっては0.012-0.020mg/l (洞爺発電所取水口, 1997年4月1日~1998年3月31日) という高い値が観測されている (北海道, 1999)。

砒素による健康被害は, 知らないうちに砒素に汚染された水を摂取することに始まる。従って, 人為的に地下水や河川水の汚染を発生させることはもちろん回避すべきであるが, 同時に自然の状態で行った汚染

については情報を積極的に公開することが重要である。

今回の事例は噴火後の火山灰の取り扱いについては慎重に行うべきであることを示しているが, 幸い, 関係機関の努力により, 火山灰が地下水と接するような環境での処分は行わない方向で, 最終処分方法についての検討が進められている。

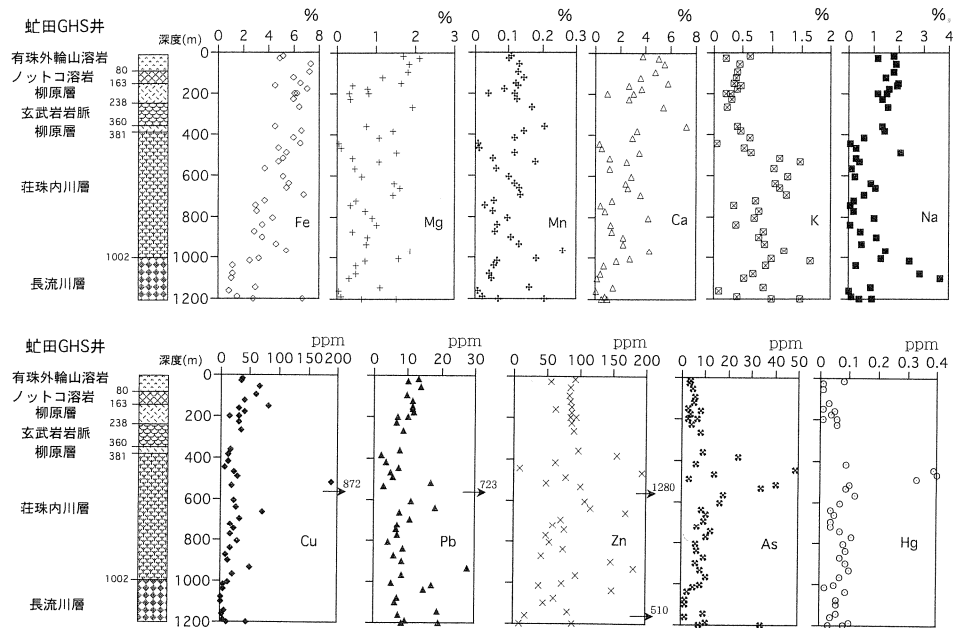
謝 辞

本研究を進めるにあたり, 気象庁, 火山噴火予知連絡会有珠山部会, 陸上自衛隊をはじめとした関係機関の方々には, 現地の観測および調査に際し, 大変お世話になった。また, 室蘭土木現業所をはじめ火山灰除去の関係機関の方々には火山灰の処分に際し, 配慮をしていただいた。当研究所の遠藤祐司氏, 柴田智郎氏をはじめ多くの職員の方々には砒素の溶出調査および試験に関し, ご助言, ご協力をいただいた。菅 和哉氏には虻田GSH井と牡警GSH井の分析結果を提供していただいた。戸間替修一氏には多数の薄片試料の作成をしていただいた。ここに記してこれらの方々には御礼申し上げる。

文 献

- 秋田藤夫・早川福利 (1992) : 洞爺湖温泉及び牡警温泉. 地熱エネルギー, 17, 380-401.
- 地学教育と科学運動特別号編集委員会編 (1997) : アジア地下水ヒ素汚染問題を考える. 地学教育と科学運動特別号, 地学団体研究会, 122p.
- Faure, G. (1998) : Principles and applications of geochemistry. 514, Prentice-Hall.
- 平林順一・安孫子勤・野上健治・大場 武・前川徳光・鈴木敦生・鈴木 隆 (2000) : 有珠山2000年噴火と地球化学的観測研究. 日本火山学会2000年度秋季大会講演予稿集, 26.
- 北海道 (1999) : 平成9年度公共用水域の水質測定結果. 442.
- Mambo, Vikandy S. and Minoru Yoshida (1993) : Behavior of arsenic in volcanic gases. *Geochem. J.* 27, 351-359.
- Mambo, Vikandy S., Minoru Yoshida and Matsuo, S. (1991) : Partition of arsenic and phosphorus between volcanic gases and rock. Part I: analytical results and magmatic conditions of Mt. Usu, Japan. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 46, 37-47.
- 中島宣雅 (1997) : ヒ素による地下水汚染の現状と地下水質環境基準. *水環境学会誌*, 20, 434-437.
- Nicholson, K. (1993) : *Geothermal fluids*. Springer, 107.
- 日本地質学会環境地質研究委員会編 (1998) : 地質環境と地球環境シリーズ4-砒素をめぐる環境問題. 東海大学出版会, 201p.
- 太田良平 (1956) : 5万分の1地質図幅「虻田」および同説明書. 地質調査所, 76p.
- 曾屋龍典・勝井義雄・新井田清信・境幾久子 (1981) : 有珠火山地質図. 地質調査所.
- 和田信彦・八幡正弘・大島弘光・横山英二・鈴木豊重 (1988) : 西胆振地域の地質と地熱資源. 地下資源調査所調査研究報告, 19, 93p.
- 八幡正弘 (1992) : 北海道南部, 西胆振地域の新生代後期の造構史と変質作用. 地下資源調査所報告, 64, 69-80.

付図1 虻田GSH井のコアおよびカッティングスの元素組成(分析:菅 和哉)
 Appendix 1 Element composition in the drill cores and cuttings, Abuta-GSH.(analyzed by K. Suga)



付図2 壮瞥GSH井のコアおよびカッティングスの元素組成(分析:菅 和哉)
 Appendix 2 Element composition in the drill cores and cuttings, Soubetsu-GSH.(analyzed by K. Suga)

