

# 宮城県南西部の廃棄物処分場周辺の水及び土壌のP I X E分析

藤巻宏和<sup>1)</sup>、鈴木真弓<sup>1)</sup>、田村俊和<sup>2)</sup>、高村弘毅<sup>2)</sup>、世良耕一郎<sup>3)</sup>、二ッ川章二<sup>4)</sup>  
阿部勝彦<sup>5)</sup>

<sup>1)</sup> 東北大学大学院理学研究科  
980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉

<sup>2)</sup> 立正大学地球環境科学部  
360-0194 埼玉県熊谷市万吉 1700

<sup>3)</sup> 岩手医大サイクロトロンセンター  
020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢字留が森 348-58

<sup>4)</sup> 日本アイソトープ協会仁科記念サイクロトロンセンター  
020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢字留が森 348-58

<sup>5)</sup> 宮城県環境生活部廃棄物対策課  
980-8570 宮城県仙台市青葉区本町 3-8-1

## 1. はじめに

ここ数年、全国各地で産業廃棄物処理場では硫化水素の発生が問題となり、地域住民が体調不良を訴える等の問題が数多く起こっている。例えば、千葉県君津市や滋賀県栗東町などの安定型の処分場で、いずれも致死量（700ppm）の数10倍の濃度の硫化水素が検出されている。また、1999年には福岡県筑紫野市では処分場の作業員が中毒死するという事故も起きている。厚生省<sup>1)</sup>によると、安定型処分場1474施設のうち11施設から $H_2S$ と思われる悪臭が確認されている。 $H_2S$ 発生による問題はこれだけにとどまらず、地表面下では、 $H_2S$ そのものや $H_2S$ が酸化されて生成した $H_2SO_4$ によって、廃棄物に含まれている有害な物質が溶脱し、地下水に溶け込み、周辺の地層と地下水の汚染を引き起こされてしまう可能性も考えられる。

本研究の調査地域とした宮城県南部の産業廃棄物処分場（図1、図2）でも $H_2S$ の発生が認められ、同様の問題が生じる可能性が指摘されている<sup>2)</sup>。当処分場は、1990年に安定型の処分場として操業を開始した。安定



図1 廃棄物処分場の位置  
159

型の処分場とは、汚染物質の流出しない廃棄物のみを土中に埋め立てることで許可されている処分場である。当処分場においても、操業を開始してから4年目の1994年には住民が悪臭を訴え始めた。2001年3月に35万4,400立方メートルの容量で満杯になってから、同年5月に高濃度の硫化水素が検出された。7月には脱臭処理前のガス抜き管で2万8,000ppmが検出されている。

本研究では処分場周囲の土壌と処分場由来と近隣の河川水試料についての調査を行った。土壌試料は汚染が発生していないとみられる処分場より標高が高い地点と、汚染が発生している可能性が考えうる処分場内の下部の2か所からのボーリングコアから、また水試料は処分場内の3つの処理池と処分場の下部の河川から採取した。土壌から溶脱されてくる各種元素、及び地下水に含まれる元素やイオン濃度を分析、比較し、処分場近辺の地下で起こっている変化を明らかにすることを目的とする。また、環境基準等の公的汚染評価基準との比較から汚染の評価を行い、さらに現在本処分地周囲の地層で何が進行しているかを考察する。

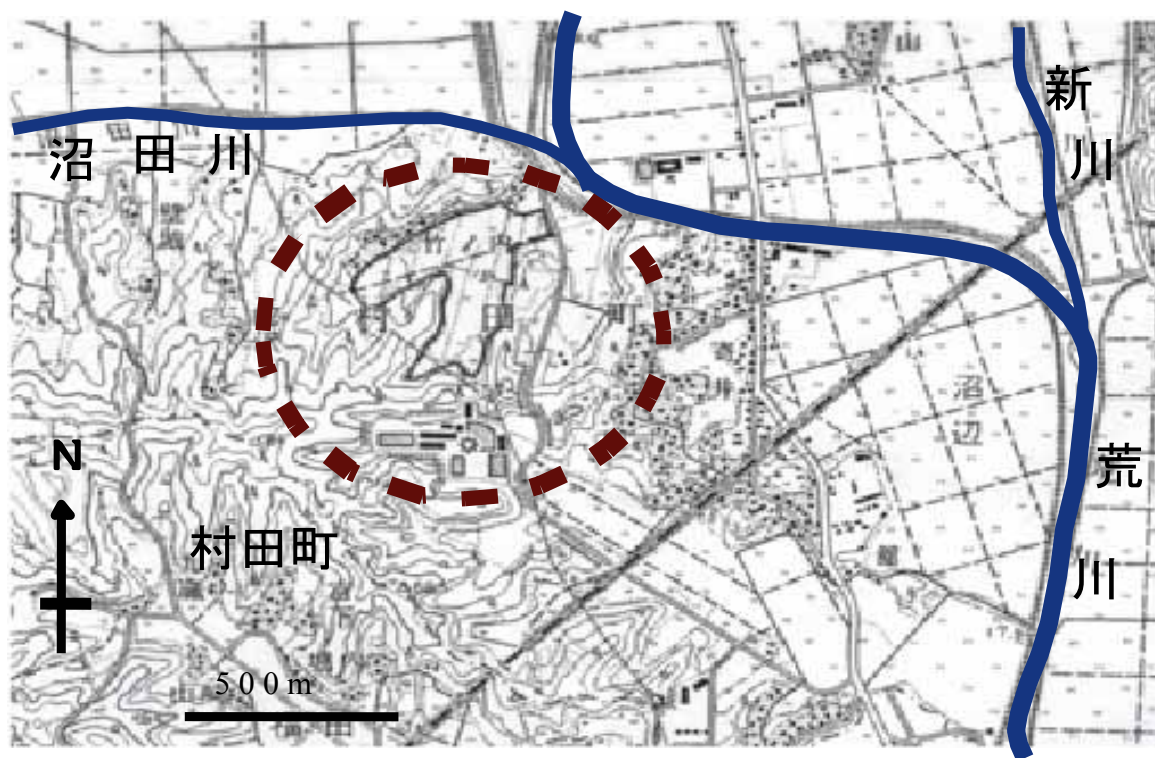


図2 廃棄物処分場の位置（拡大図）

## 2. 安定型処分場とその問題点

安定型の処分場とは、廃棄物処理法に規定されている安定5品目のみを直接土壌中に埋め立て処理することが認められている処分場である。安定5品目とは、廃プラスチック類（自動車等破砕物、鉛含有廃プリント配線板、廃容器・包装不要物を除く）、ゴムくず、金属くず（自動車等破砕物、鉛含有廃プリント配線板、鉛蓄電池の電極であって不要な物、鉛管・鉛板不要物、廃容器・包装不要物を除く）、ガラスくず（自動車等破砕物、側面部廃ブラウン管、廃石膏ボード、廃容器・包装不要物を除く）、工作物の除去コンクリート等で、本来汚水や有毒物質はいつさい出ないことになっている。しかし、安定5品目からそれ以外の廃棄物を取り除くことは不可能に近いと言われており、以前から、安定5品目として埋め立てられた廃棄物の中には5品目以外の廃棄物が混入していることが指摘されている。

前述したように、近年、全国各地で産業廃棄物処理場では硫化水素の発生が問題となっている。安定型の処分場で、 $H_2S$ の発生による問題は、発生した $H_2S$ を吸うことにより、住民や作業員が体調の不良を訴えるという表立った問題だけではない。地表面下では、 $H_2S$ そのものや $H_2S$ が酸化されて生成した $H_2SO_4$ によって埋立てられた廃棄物が溶かされてしまい、廃棄物に含まれている有害な物質が溶脱してくるという可能性がある。重金属等を含んでいると指摘されている産業廃棄物として、例えば、防腐、防蟻処理（Pb、Cu、Hg、アンモニウム化合物など）が施された木材がある。また、コンクリートから六価クロムが溶出してくるという指摘もある。そしてまた、土壌中に溶脱した重金属等は地下水に溶け込み、地下水の汚染が引き起こされてしまう可能性も考えられる。

安定型の処分場から H<sub>2</sub>S が発生した理由としては、地中に住む硫酸還元菌が、過去に埋めた石膏ボードの SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> と有機物を使って H<sub>2</sub>S を生成したということが旧厚生省水道環境部産業廃棄物対策室<sup>1)</sup> 等により指摘されている。調査地域とした産業廃棄物処分場においても、上記で示した硫化水素発生に伴う同様の問題が指摘されている。

### 3. 調査地域及び処分場の概要

#### 3.1 地形

調査地域は蔵王火山の東麓から東に広がる丘陵地にある。処分場のあたりは低い丘陵地で、起伏量150m以下である。第三紀・第四紀の火山砕屑岩を基盤としている。処分場は、その丘陵地の上に発達した河岸平野の上であり、幅200m程度の谷底面に位置する。処分場の北西側には新第三系基岩が向斜構造を成しており、それに沿って東北自動車道が走っている。処分場内は、南西から北東に向かって10°前後に傾斜している。南側の処分場より標高が高い場所に、かつて一般廃棄物の焼却場があった。処分場はもともとは水田として利用されてきた。処分場の南側には畑が点在しており、さらに丘陵地上部は、林になっている。処分場のすぐ北側を流れる荒川は、調査地域の南側を流れる白石川の支流で、南東へと流れていき白石川の下流部に合流している。以下に調査地域周辺の地形を示す(図3)<sup>3)</sup>。

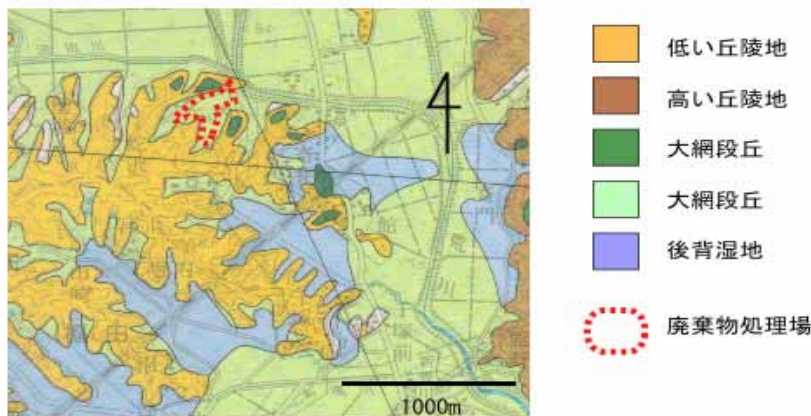
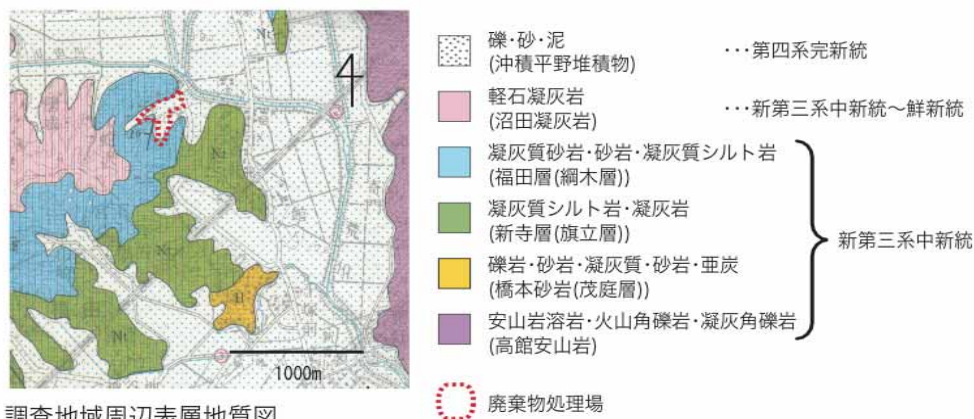


図3 調査地域周辺土地分類図  
(土地分類基本調査・白石(1985)より)

#### 3.2 周辺地質

調査地域の地質は、土地分類基本調査「白石」5万分の<sup>3)</sup>によると、先第三系と新第三系からな



調査地域周辺表層地質図  
(土地分類基本調査・白石(1985)より)

図4 調査地域周辺の地表地質図



る。先第三系は、白亜紀前期頃に形成された深成岩類で、花崗岩類や片麻岩類から成る（図4）。新第三系は中新統の槻木層（固結堆積物）、さらに上部には、同じく新第三系中新統の高館安山岩類（安山岩質火山性堆積物）と橋本砂岩（固結堆積物）が一部指交関で覆っており、その上部には新寺層、福田層（固結堆積物）が覆っている。槻木層は凝灰質砂岩・凝灰質シルト岩・凝灰岩・礫岩・礫質砂岩等の不規則な互層から成り、亜炭層を挟む。高館安山岩類は安山岩溶岩及び火山角礫岩を主体とし、固結度が高い。橋本砂岩は粗粒砂岩及び凝灰質砂岩から成り、基底部に礫岩を伴い、亜炭層を挟む。これらはすべて不整合をなしている。新寺層は凝灰質物質の少ない細粒堆積岩を主体とする。福田層は凝灰質砂岩・凝灰岩・凝灰質砂岩の不規則な互層から成る。橋本砂岩、新寺層、福田層は、それぞれ茂庭層、旗立層、綱木層に対比される。

その上部には、新第三系中新統から先新統の沼田凝灰岩（火山性堆積物）が福田層を不整合に覆っている。沼田凝灰岩は石英安山岩質軽石流堆積物として形成されたもので、塊状無層理の軽石凝灰岩から成る。

当処分場の地質は、深成岩類、槻木層、高館安山岩類、橋本砂岩、新寺層、福田層と重なっており、その上に第四系完新統の沖積平野堆積物（未固結堆積物）が覆っている。

### 3.3 土壌

土壌を含む模式柱状図を図5に示す。沖積平野堆積物は礫・砂・泥から成る。

図5はその周辺地域の模式柱状図である。廃棄物が埋められているのは、福田層と新寺層である。

処分場よりも南側の丘陵地の高い方は褐色森林土であり、一般畑作物が主として栽培されている畑土壌が散在している。土地分類基本調査「白石」<sup>3)</sup>によると、処分場は低位泥炭土壌の長富統であり、過湿地に繁茂した葦を主体とする植物遺体が、不完全な分解を経て泥炭化したものである。主要母材は植物遺体であり、堆積様式は集積である。低位泥炭土壌は同じく泥炭土の黒泥土壌よりも植物の分解が進んでおらず、地下水位も高く、養分的にも無機成分が著しく不足している。周辺は水田として利用されており、処分場もかつては水田であった。

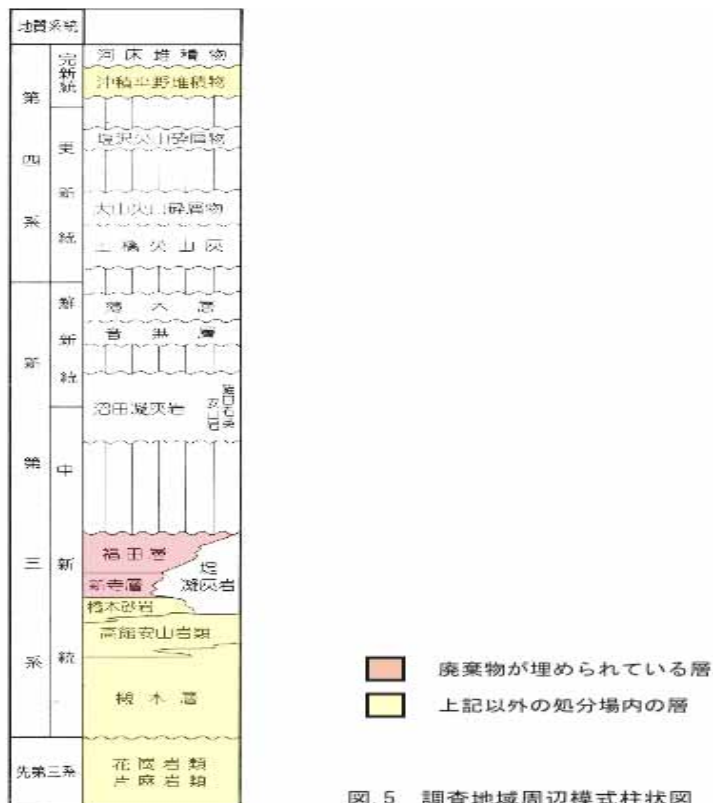


図5 調査地域周辺模式柱状図  
(土地分類基本調査・白石(1985)より)

### 3.4 処分場の概要

当処分場は、安定型の処分場として操業を開始した。安定型の処分場とは、廃棄物処理法に規定されている安定5品目のみを直接土壌中に埋め立て処理することが認められている処分場である。環境生活委員会配布資料<sup>2)</sup>によると、埋め立て地に埋立てられている廃棄物はがれき類、金属くず、ガラス及び陶磁器くずなどの不燃物類が42.97～68.28%、廃プラスチック類及びゴムくずなどの難燃性可燃物が24.83～50.90%、安定型産業廃棄物以外の紙くず、木くず及び繊維くずなどの易燃性可燃物が2.70～4.36%ということであった。しかし、2003年12月のボーリング調査で許可区域外まで廃棄物が埋立てられていたことが明らかになったことから、実際のところは不明である。

当産廃場は、1990年の操業開始以後、1991年11月には住民からの放流水の濁りについての苦情が出始め、1994年には悪臭が訴えられ始めた。2001年3月に35万4,400立方メートルの容量で満杯になってから、同年5月に高濃度の硫化水素が検出され、7月には脱臭処理前のガス抜き管で2万8,000ppmが検出された。2003年5、6月には処理業者が措置命令に応じなかったため県が部分的な代執行に踏み切る。代執行として処理池に貯めた汚水の処理を開始し、また、廃棄物が露出している埋め立て地の覆土と整地を行った。しかし、住民の不安はいっこうにおさまらず、2003年12月に県は廃棄物を埋め立てている場所のボーリング調査を実施した。調査では、廃棄物層の深さが14～21m程度に達することがわかり、容量を大幅に上回る廃棄物が埋められていたことが明るみに出た。

ボーリング調査の結果から、当産廃場は地表面下が湿潤状態であり嫌氣的性状をしめしていること、廃棄物層に有機物が多く含まれていること等から、有機物の生物分解に伴いより嫌氣的な状態となり、硫酸還元菌の活動が活発になる条件を有している。また、廃棄物中に廃石膏ボードや解体系建設混合廃棄物が含まれており、その中の硫黄分が硫化水素に還元されている可能性が高い。

現在、本処分場においては、処分場から浸出した排水に対して浄化の措置を行っている。浄化の方法は、浸出水を1か所に集め、ポンプで処分場の上部に設置した3段階の処理池に移送する。処理地では、水酸化ナトリウムの薬物注入による排水の中性化を行い、重金属等の除去を促す。処理された水は、処分場下部の公共用水域に排水される。また、処分場の上部の沢水が廃棄物と触れることがないように、処分場内に排水用のヒューム管が埋設され、排水は公共用水域に排出される。処分場内の水の循環を含めた概念図を模式的に図6に示す。あわせてボーリングした2地点と水試料の採取地点も示した。

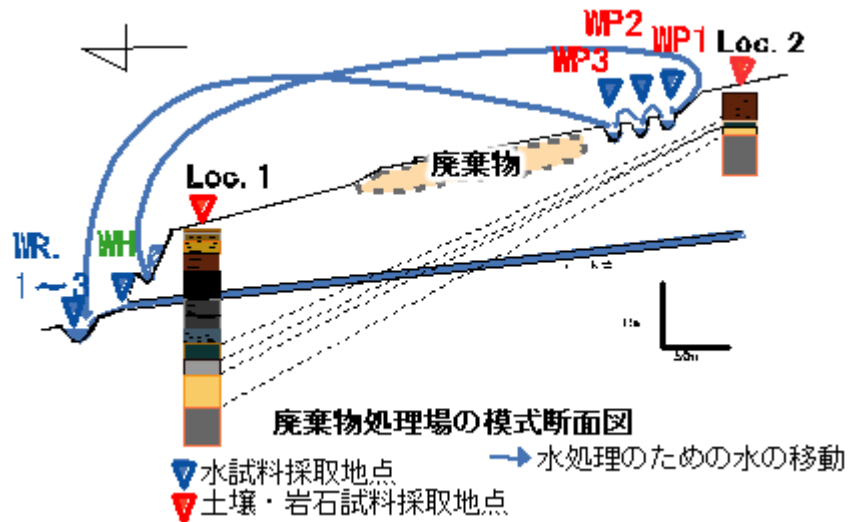


図6 模式的廃棄物処分場の概念図

## 4. 試料採集

### 4.1 水試料の採集

水試料は、次の7地点(図6)から採集した。まず、荒川の、処分場に最も近い2地点(WR1, WR2)からと、そこから上流に500mほど上った1地点(WR3)から、計3試料採集した。ここでは、処分場南西の谷間を流れてくる沢の水が処分場内の廃棄物に接触しないようにヒューム管が通されている。その中を沢の水が流れており、処分場下でヒューム管から出てくるようになっているので、そのヒューム管から出てくる水(WH)

を採集した。この処分場では、地下を通してしみ出してくる水を処分場南側に作った処理池にくみ上げ、NaOHを加えて重金属等の汚染物質を3つの溜め池で3段階に渡って沈澱させている。そこで、1段階目の処理池の水(WP1)、2段階目の水(WP2)、3段階目の水(WP3)をそれぞれ採集した。各水試料は、十分に洗浄したポリエチレン容器に採集し、その際、pHの測定も行った。

#### 4.2 土壌試料の採集

土壌試料は図6の、廃棄物が埋立てられているエリアよりも標高の低いLoc.1と、標高の高いLoc.2のボーリングコアから採集した。Loc.1からは28試料を、Loc.2からは10試料を採集した。1地点から10cm幅ずつポリ塩化ビニルの袋に採集した。なお、ボーリングコアの柱状図を図7に示す。

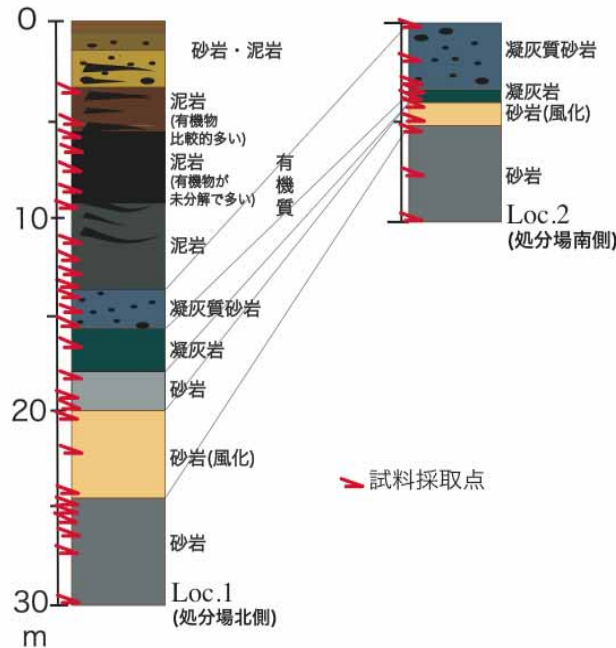


図7 ボーリングコアの柱状図

## 5. 実験方法

### 5.1 土壌試料の分析

土壌から溶脱されてきた試料中の元素濃度の測定には、仁科記念サイクロトロンセンターのサイクロトロンを用いて、生物にとって有害な重金属 (Cd、Cu、Cr、Hg、Pbなど) やAsをはじめとする計23元素についてPIXE分析を行った。この際インジウムを内部標準として使用した。分析方法はSera and Futatsugawa<sup>4) 5)</sup>に従った。

前処理として、まず土壌試料を乾燥させ、土壌試料に吸着している重金属等を濃硝酸、濃塩酸、過塩素酸を用いて溶脱させる方法<sup>6)</sup>を採用した。

本研究では日本の基準値に準じた方法をとらずに先進諸外国の場合のように強酸性水による溶出濃度分析を行った。わが国の環境庁告示に基づく溶出分析では、重金属を溶出させる際に中性付近の水を用いるが、この場合、吸着力の強い鉱物に吸着された重金属がほとんど溶脱されないという問題が発生するからである。

### 5.2 水試料の分析

水試料の元素濃度は、土壌試料と同じくPIXE分析法を採用した。200m lの水試料を0.45ミクロンのフィルターを通して圈濁物や浮遊物を除去した。水試料についてはPIXEで硫黄の分析を行わなかったため、テフロン容器に入れ内部標準のインジウムを入れた後50度Cで徐々に蒸発させ、1滴程度になるまでに体積を減少させた。その後、1滴程度の試料をマイラー膜に滴下し分析用に準備した。

## 6. 分析結果

### 6.1 土壌試料から溶脱されてきた元素濃度

土壌試料から強酸によって溶脱された元素について PIXE 分析した結果を表 1-9 及び図 8-15 に示す。

表 1 Loc.1 PIXE分析結果（深さ3.50～5.80m地点）（単位：mg/kg）

	3.5	4.9	5.6	5.8
Ag	n. d.	1.6	0.6	0.6
Al	25210.7	12141.7	2671.3	1937.5
As	0.0	n. d.	n. d.	2.9
Ba	148.8	200.7	120.7	14.3
Br	0.8	0.1	n. d.	4.7
Ca	5497.3	4726.5	1903.9	2484.8
Cu	49.2	27.6	8.9	9.4
Fe	13479.3	7625.2	7179.3	7834.8
Ga	4.5	1.6	2.1	0.5
Hg	n. d.	0.7	n. d.	n. d.
K	915.8	243.9	59.6	147.7
Mg	595.6	406.8	196.8	107.1
Mn	472.5	224.3	70.8	154.0
Mo	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Na	609.0	314.0	89.0	248.9
Nb	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Ni	53.4	9.1	n. d.	2.9
P	167.1	93.6	64.0	42.0
Pb	29.4	20.6	18.2	6.7
Rb	9.5	4.9	n. d.	4.3
S	1021.3	297.9	171.1	899.5
Sb	n. d.	5.0	n. d.	0.4
Se	0.3	n. d.	n. d.	n. d.
Si	279.9	101.4	16.4	21.6
Sn	5.8	5.0	n. d.	5.7
Sr	58.4	49.4	40.5	29.3
Ti	48.5	51.6	n. d.	91.1
Y	16.7	17.9	0.0	2.3
Zn	312.1	121.0	33.4	37.4
Zr	n. d.	0.1	0.1	5.5

n. d. : not detected

表2 Ioc.1 PIXE分析結果（深さ6.60～9.40m地点）（単位：mg/kg）

	6.6	7.5	8.4	9.4
Ag	1.5	1.3	2.3	1.2
Al	3243.4	5705.5	2798.8	3572.8
As	2.6	n. d.	4.0	5.7
Ba	111.4	98.3	n. d.	157.7
Br	4.0	n. d.	0.5	4.2
Ca	2540.7	3561.5	5250.2	2873.3
Cu	11.6	21.4	16.8	16.7
Fe	7250.9	15575.5	12677.1	21537.6
Ga	1.1	3.7	2.4	2.0
Hg	n. d.	n. d.	1.3	n. d.
K	155.0	313.2	375.6	254.8
Mg	135.1	1250.2	460.9	386.3
Mn	135.4	342.0	256.8	452.9
Mo	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Na	268.8	167.6	216.4	217.1
Nb	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Ni	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
P	131.4	73.9	93.6	148.2
Pb	12.0	21.3	20.8	25.7
Rb	2.2	n. d.	4.0	4.9
S	1091.0	1145.3	4534.0	2562.6
Sb	n. d.	2.9	6.6	10.0
Se	0.3	n. d.	0.2	1.2
Si	199.9	213.7	118.7	238.1
Sn	0.0	1.8	2.7	n. d.
Sr	28.8	37.0	50.0	33.0
Ti	98.1	9.7	185.2	43.3
Y	19.6	0.0	15.8	17.2
Zn	27.9	104.9	59.2	50.7
Zr	13.3	3.8	16.2	18.7

n. d. :not detected



表3 Loc.1 PIXE分析結果（深さ11.3～13.70m地点）（単位：mg/kg）

	11.3	13.2	13.3	13.7
Ag	0.4	0.9	0.1	n. d.
Al	7336.5	9007.2	4767.0	8400.7
As	n. d.	2.6	n. d.	0.5
Ba	96.4	132.8	62.0	107.1
Br	n. d.	n. d.	0.4	n. d.
Ca	2417.6	4238.5	1215.3	4263.9
Cu	14.2	20.8	10.0	20.4
Fe	26889.4	40537.8	13342.0	34711.2
Ga	5.3	1.1	2.2	3.5
Hg	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
K	89.0	352.7	86.3	217.4
Mg	740.9	1651.9	351.4	1546.2
Mn	204.3	395.3	59.2	589.2
Mo	0.3	n. d.	n. d.	n. d.
Na	176.3	179.2	35.5	17.9
Nb	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Ni	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
P	71.1	229.0	57.1	179.6
Pb	29.6	49.2	21.3	42.2
Rb	n. d.	n. d.	4.5	
S	425.3	1754.5	340.7	1395.7
Sb	1.5	4.4	n. d.	6.4
Se	n. d.	0.3	n. d.	n. d.
Si	125.5	499.5	25.4	202.3
Sn	2.4	n. d.	n. d.	3.4
Sr	41.2	65.1	33.2	55.6
Ti	1.5	0.0	7.3	47.9
Y	0.0	0.0	13.3	0.0
Zn	51.6	110.3	27.1	76.4
Zr	4.0	5.8	6.9	5.8

n. d. : not detected

表4 Loc.1 PIXE分析結果（深さ13.80～15.90m地点）（単位：mg/kg）

	13.8	14.9	15.7	15.9
Ag	1.0	1.2	0.0	0.2
Al	43306.9	6503.9	4446.8	6783.4
As	n. d.	0.1	9.5	1.2
Ba	73.3	58.9	56.0	57.6
Br	1.8	n. d.	n. d.	n. d.
Ca	2603.0	1140.1	1920.7	2375.8
Cu	18.5	5.4	3.8	5.9
Fe	27756.0	9210.2	13215.8	7999.5
Ga	11.1	2.8	1.1	2.0
Hg	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
K	581.4	230.1	435.2	281.7
Mg	586.1	222.5	274.9	194.4
Mn	390.1	40.6	34.2	42.1
Mo	n. d.	n. d.	0.4	n. d.
Na	158.6	44.2	51.0	36.9
Nb	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Ni	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
P	125.3	41.7	n. d.	31.7
Pb	13.0	9.7	18.4	13.6
Rb	8.1	n. d.	n. d.	n. d.
S	60.3	88.7	3609.1	184.1
Sb	n. d.	2.6	1.8	n. d.
Se	n. d.	n. d.	n. d.	0.2
Si	289.7	67.8	56.1	38.4
Sn	12.3	n. d.	0.2	5.6
Sr	26.6	20.1	21.6	n. d.
Ti	219.1	27.6	49.4	11.8
Y	8.4	0.0	0.0	0.0
Zn	41.3	27.4	65.8	35.7
Zr	5.0	1.4	1.7	1.2

n. d. : not detected

表5 Loc.1 PIXE分析結果（深さ17.90～19.80m地点）（単位：mg/kg）

	17.9	18.1	19.1	19.8
Ag	0.0	2.5	0.1	0.1
Al	13619.3	10444.9	2501.2	2580.5
As	n. d.	0.5	n. d.	n. d.
Ba	35.1	83.4	32.7	33.7
Br	n. d.	0.0	n. d.	n. d.
Ca	1029.3	2740.1	1829.5	1860.7
Cu	n. d.	8.6	2.7	4.9
Fe	23995.9	19198.1	5454.4	7470.9
Ga	3.5	2.7	0.6	0.7
Hg	2.3	n. d.	n. d.	1.3
K	798.8	682.2	110.8	200.5
Mg	420.4	533.6	211.9	231.3
Mn	122.9	81.1	60.3	42.2
Mo	n. d.	n. d.	0.1	0.0
Na	26.6	47.5	72.3	35.6
Nb	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Ni	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
P	7.7	23.7	n. d.	4.2
Pb	3.2	11.5	10.2	8.7
Rb	n. d.	8.4	n. d.	n. d.
S	970.9	244.6	64.6	136.4
Sb	n. d.	n. d.	0.4	n. d.
Se	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Si	96.7	84.8	21.3	11.4
Sn	0.3	0.5	0.0	n. d.
Sr	12.0	56.0	32.5	36.6
Ti	0.0	17.6	21.0	25.2
Y	0.0	8.8	0.0	0.0
Zn	15.0	117.7	16.2	21.7
Zr	4.5	n. d.	0.2	n. d.

n. d. : not detected

表6 Loc.1 PIXE分析結果（深さ20.05～25.45m地点）（単位：mg/kg）

	20.1	22.1	24.4	25.5
Ag	n. d.	1.1	5.4	n. d.
Al	8471.7	2636.4	41722.3	2609.4
As	2.0	n. d.	3.5	59.5
Ba	25.8	128.9	73.2	16.7
Br	n. d.	0.0	n. d.	n. d.
Ca	2554.4	2313.4	2307.3	5333.7
Cu	10.3	26.2	7.1	25.1
Fe	26252.9	15423.2	20594.7	35483.8
Ga	2.5	2.8	6.4	0.0
Hg	1.9	0.8	n. d.	n. d.
K	1951.8	1399.4	1796.2	1032.9
Mg	525.6	949.9	1444.6	848.8
Mn	198.0	204.1	186.8	316.5
Mo	n. d.	n. d.	1.2	n. d.
Na	238.1	140.5	881.4	216.3
Nb	n. d.	n. d.	n. d.	1.2
Ni	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
P	121.3	5.8	1.7	863.8
Pb	11.6	11.7	11.6	58.2
Rb	n. d.	40.9	n. d.	n. d.
S	92.4	n. d.	39.8	36.0
Sb	n. d.	n. d.	19.4	n. d.
Se	n. d.	0.0	0.1	n. d.
Si	156.3	163.3	237791.2	3306.0
Sn	n. d.	2.0	9.1	n. d.
Sr	75.0	301.9	90.6	227.8
Ti	79.4	52.9	325.4	88.4
Y	0.0	12.0	0.0	0.0
Zn	33.4	52.3	30.0	82.0
Zr	n. d.	9.0	2.1	13.1

n. d. : not detected

表7 Loc.1 PIXE分析結果（深さ25.75～29.90m地点）（単位：mg/kg）

	25.8	26.7	27.7	29.9
Ag	1.7	1.0	8.6	1.4
Al	13974.3	23975.8	11606.2	8351.6
As	0.5	n. d.	n. d.	n. d.
Ba	7.8	36.8	146.4	142.6
Br	1.0	0.8	n. d.	0.3
Ca	3316.4	4948.8	12709.9	4393.0
Cu	5.3	4.2	33.2	13.1
Fe	10376.9	21792.1	34321.9	38324.9
Ga	1.7	1.8	1.6	1.2
Hg	n. d.	n. d.	16.2	n. d.
K	967.6	1705.3	8841.5	1858.4
Mg	550.0	1865.3	2572.6	447.9
Mn	67.8	159.2	469.2	136.3
Mo	1.0	0.6	n. d.	n. d.
Na	215.7	282.3	184.7	86.9
Nb	1.2	n. d.	2.2	0.9
Ni	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
P	104.1	138.3	1130.2	89.0
Pb	13.0	7.8	13.3	18.0
Rb	5.7	17.7	n. d.	14.4
S	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Sb	2.5	30.0	4.6	4.0
Se	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Si	1541.5	438.0	1234.7	139.0
Sn	n. d.	n. d.	6.0	1.2
Sr	134.7	163.7	463.0	377.9
Ti	0.0	42.3	155.9	433.6
Y	1.8	3.5	0.0	5.5
Zn	32.0	51.8	126.7	30.3
Zr	1.2	7.1	19.4	20.8

n. d. :not detected



表8 Loc.2 PIXE分析結果(深さ0.10~4.10m地点) (単位 : mg/kg)

	0.1	1.9	3.2	3.3	3.9	4.1
Ag	n. d.	n. d.	n. d.	1.1	n. d.	3.4
Al	5768.8	22184.4	18695.5	8322.9	2088.2	6296.4
As	n. d.	n. d.	1.7	n. d.	n. d.	n. d.
Ba	104.9	148.0	111.9	187.1	20.2	88.8
Br	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Ca	2028.1	2699.2	15123.9	7352.9	40600.2	8004.9
Cu	8.5	16.5	17.3	6.2	n. d.	n. d.
Fe	33018.6	66066.0	47156.8	27345.7	12686.3	38808.1
Ga	2.4	1.7	n. d.	0.7	0.3	0.7
Hg	n. d.	n. d.	1.5	8.0	28.5	n. d.
K	79.8	461.6	2094.2	259.6	157.9	102.5
Mg	390.0	930.4	8182.3	1607.3	725.0	1157.8
Mn	690.4	1303.0	884.7	295.6	965.8	5689.0
Mo	1.0	1.4	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Na	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Nb	0.6	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	0.1
Ni	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
P	104.4	119.1	642.3	156.7	188.7	32.6
Pb	22.9	67.5	47.9	24.9	15.9	7.3
Rb	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
S	32.7	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Sb	n. d.	12.5	21.5	n. d.	5.2	n. d.
Se	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Si	40.5	691.9	1385.9	32.1	138.0	140.3
Sn	n. d.	n. d.	n. d.	2.1	n. d.	n. d.
Sr	46.3	41.3	131.9	116.1	70.8	69.1
Ti	365.5	956.2	282.0	2.4	50.1	9.9
Y	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Zn	35.1	56.3	82.4	54.9	21.2	11.3
Zr	4.8	20.5	20.6	6.9	7.3	7.6

n. d. :not detected

表9 Loc.2 PIXE分析結果（深さ5.00～9.90m地点）（単位：mg/kg）

	5.0	5.3	7.9	9.9
Ag	n. d.	n. d.	n. d.	0.1
Al	2088.2	6341.8	15219.0	4495.3
As	n. d.	3.6	0.9	n. d.
Ba	15.4	269.5	45.5	8.8
Br	n. d.	n. d.	0.3	0.6
Ca	2600.8	11754.5	5166.4	2376.0
Cu	1.7	2.5	9.7	1.4
Fe	11310.2	19930.6	34601.5	15561.0
Ga	1.6	0.9	5.6	1.6
Hg	n. d.	5.0	n. d.	0.2
K	196.9	2617.0	248.3	292.4
Mg	198.6	734.2	1355.9	281.4
Mn	216.5	369.0	84.0	12.7
Mo	n. d.	0.0	1.8	0.3
Na	n. d.	52.8	14.7	n. d.
Nb	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Ni	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
P	38.1	54.7	n. d.	25.8
Pb	15.2	11.4	22.6	16.9
Rb	n. d.	n. d.	7.5	6.5
S	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Sb	n. d.	n. d.	5.1	n. d.
Se	n. d.	0.0	n. d.	n. d.
Si	108.3	402.2	33.8	191.7
Sn	n. d.	0.9	11.2	1.5
Sr	38.1	227.9	289.6	150.6
Ti	1.6	102.7	233.3	90.1
Y	0.0	0.0	6.4	4.6
Zn	15.3	38.0	67.5	18.5
Zr	2.6	7.2	19.2	11.0

n. d. : not detected

次にこれら溶脱された元素の存在度を、深さに従ってどのように変化するかを示す。この際、非常に多く含まれる元素と、極微量にしか含まれない元素があるために、縦軸の目盛を4種類に変えて注目すべき元素が見やすいように表示した。

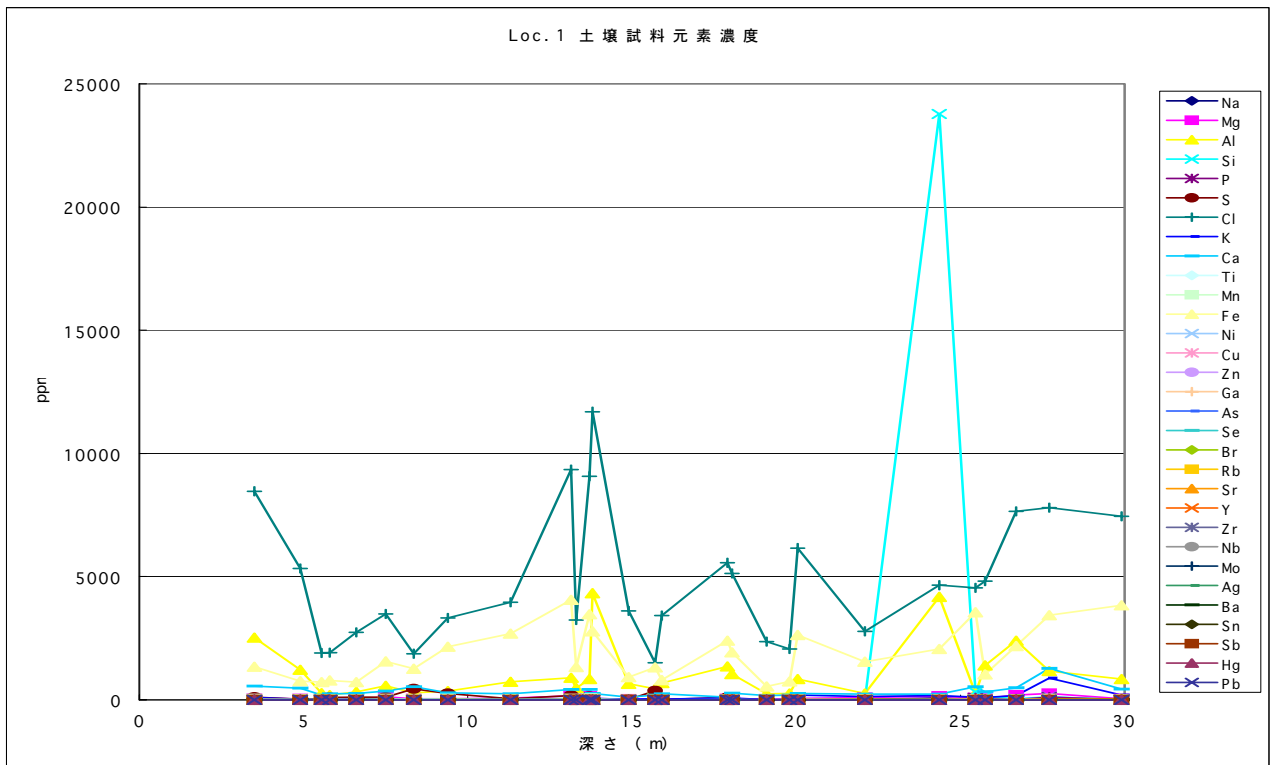


図8 Loc. 1の土壤試料から溶脱された元素濃度の変化

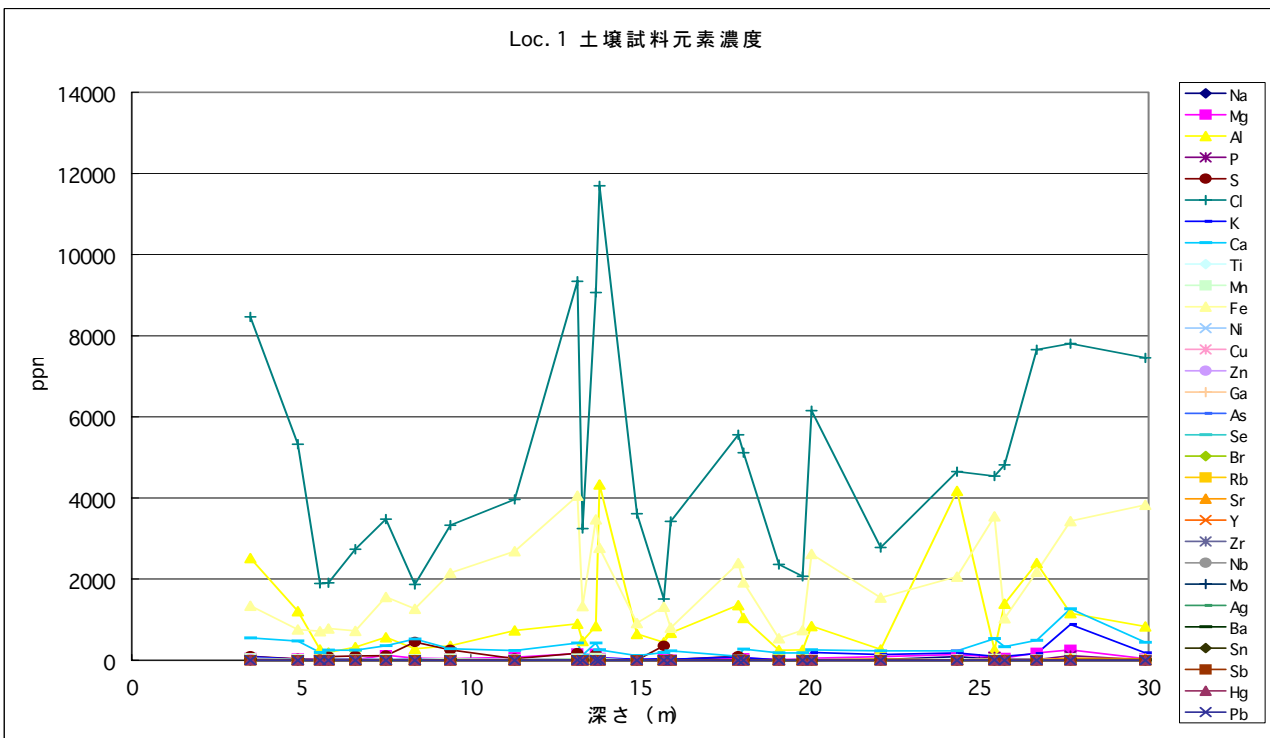


図9 Loc. 1の土壤試料から溶脱された元素濃度の変化

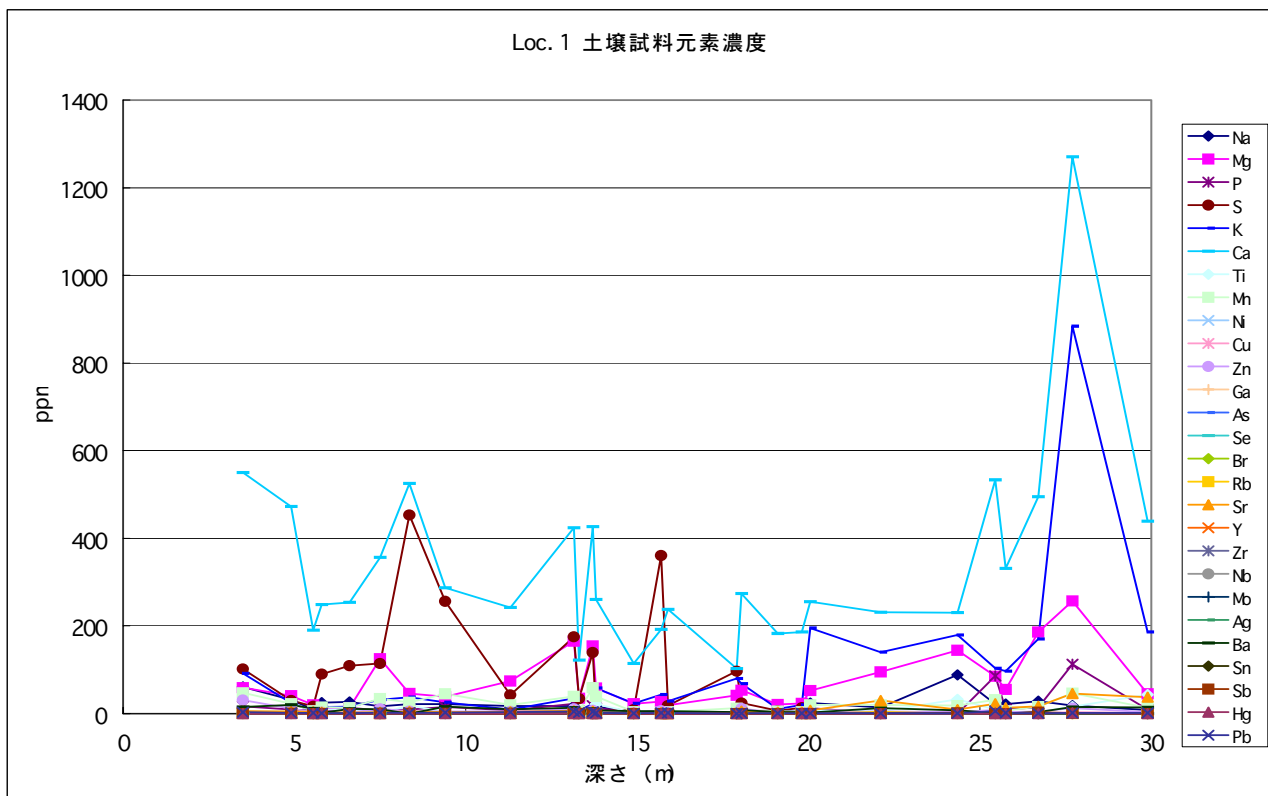


図 10 Loc. 1 の土壤試料から溶脱された元素濃度の変化

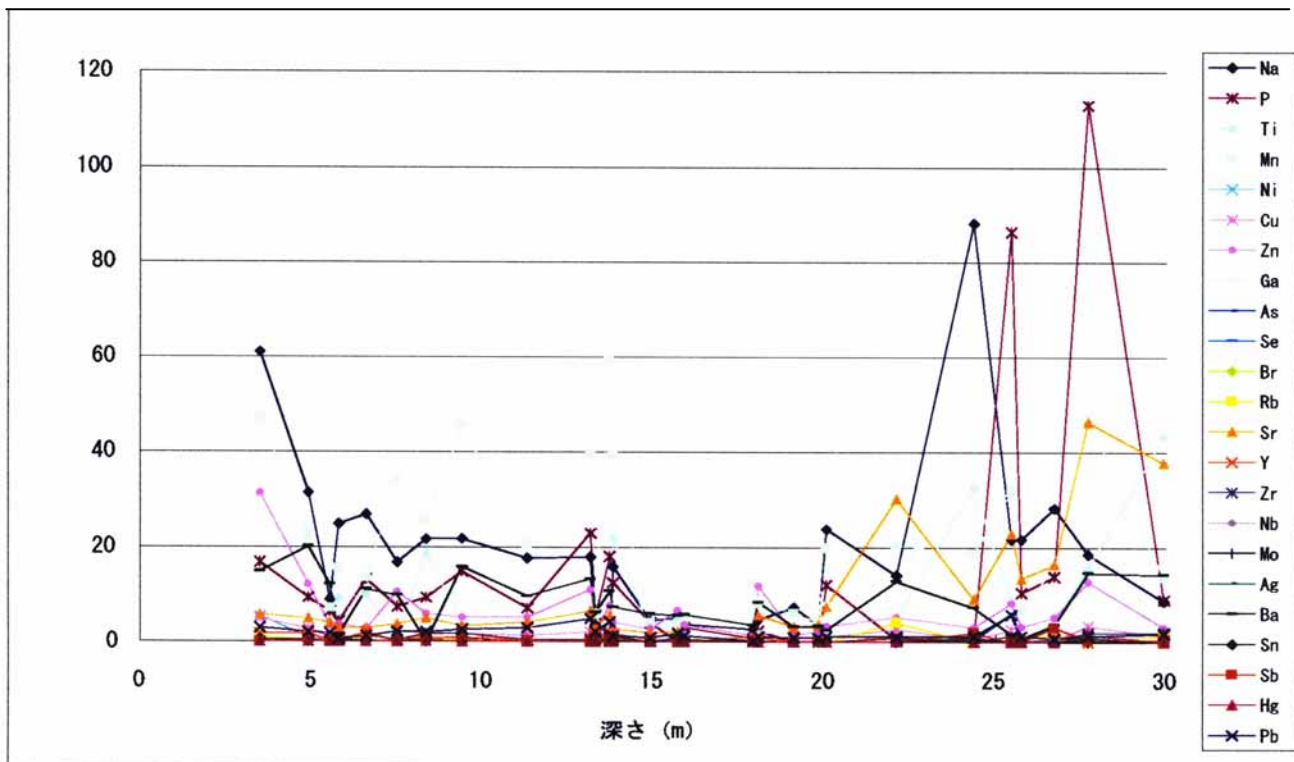


図 11 Loc. 1 の土壤試料から溶脱された元素濃度の変化

以下同様に、処分場の地層の上位で得られた Loc2. の元素濃度の深さに対する変化を示す。

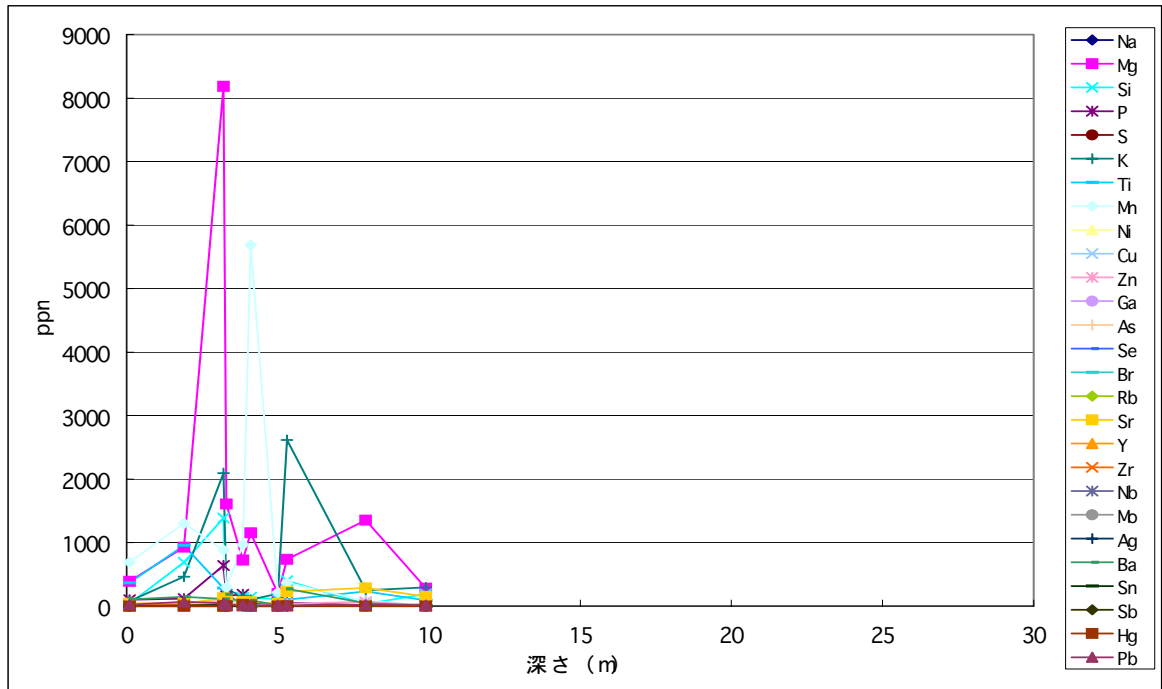


図 12 Loc. 2 の土壌試料から溶脱されてきた元素濃度の変化

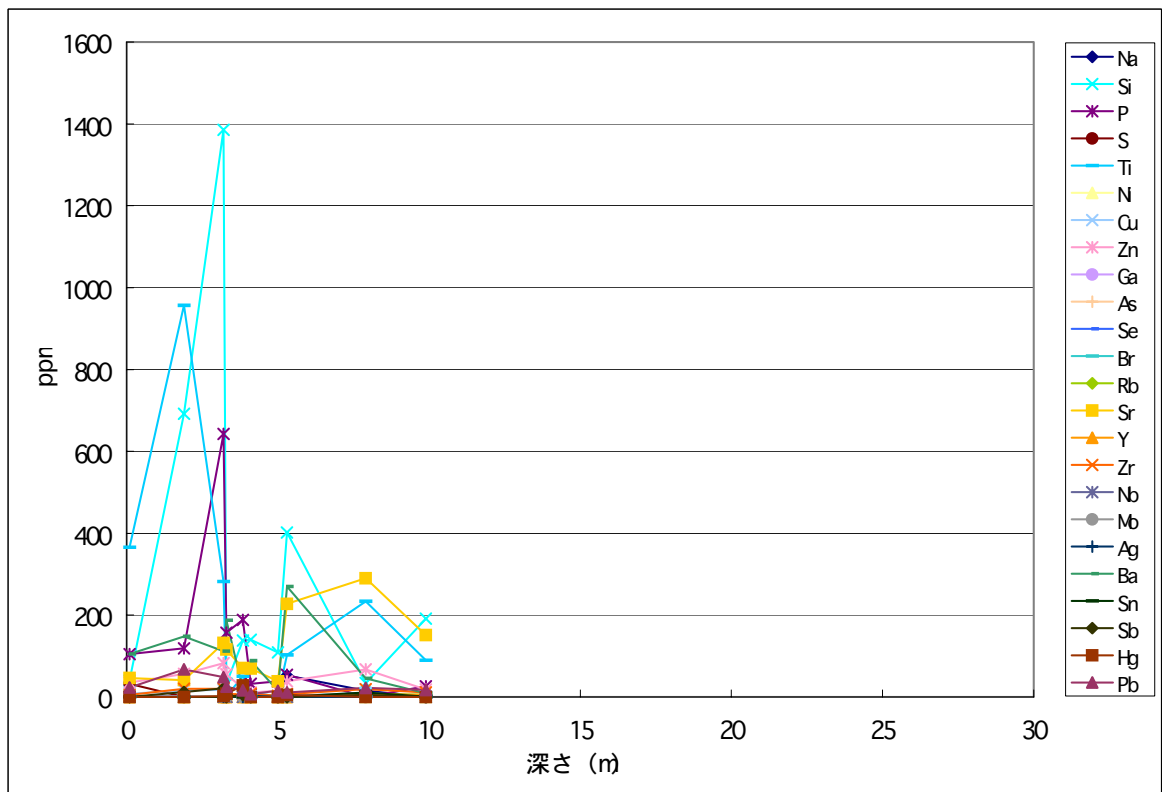


図 13 Loc. 2 の土壌試料から溶脱されてきた元素濃度の変化



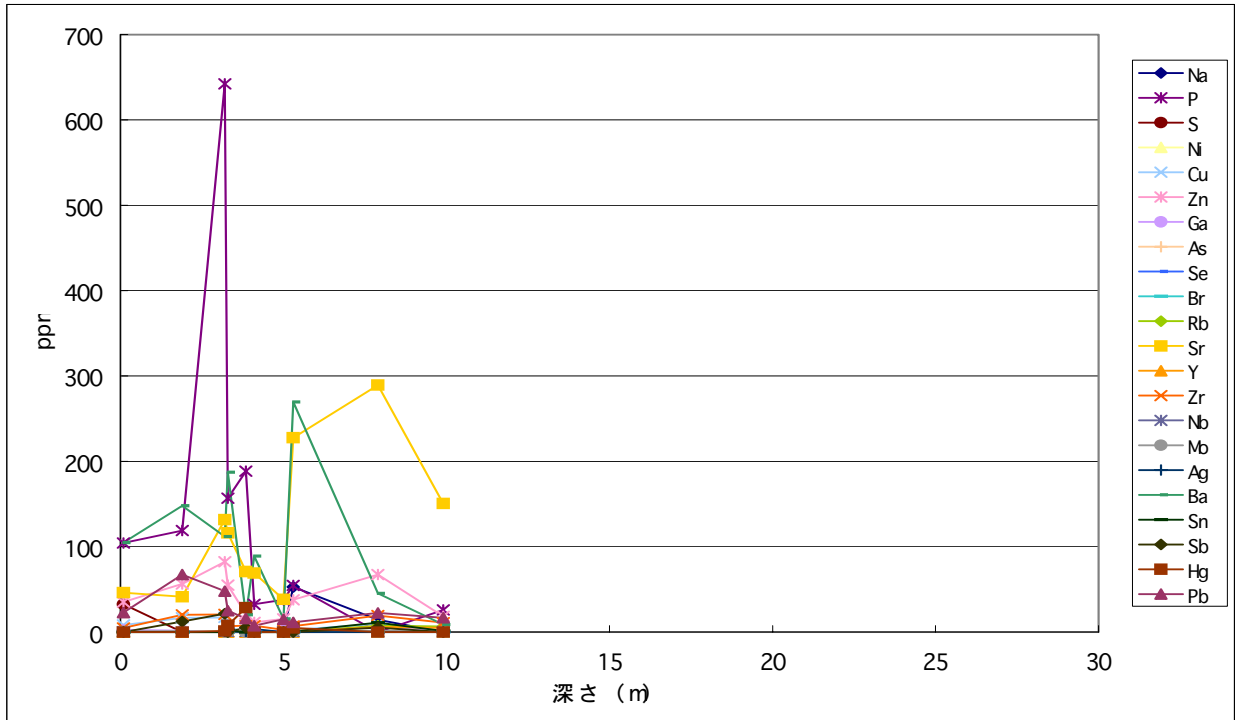


図 14 Loc. 2 の土壌試料から溶脱されてきた元素の濃度変化

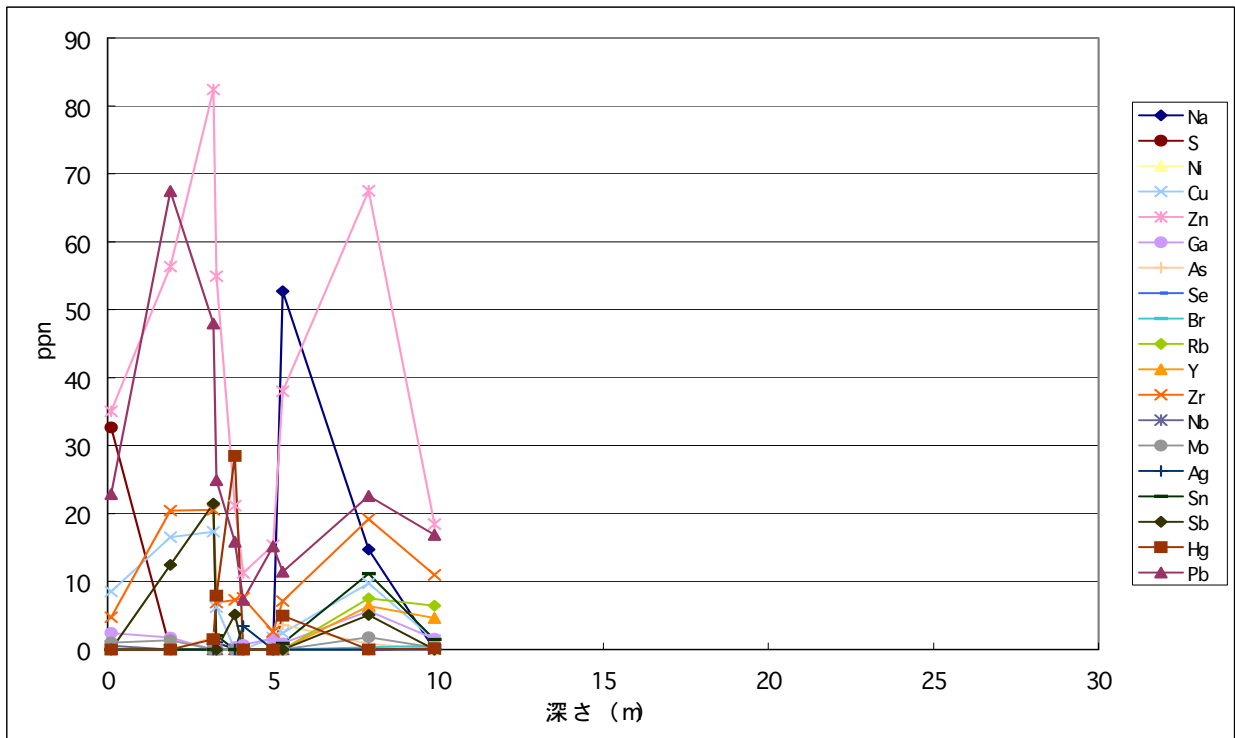


図 15 Loc. 2 の土壌試料から溶脱されてきた元素の濃度変化

以上の分析結果及び、図 8-15 に示したように溶脱されてくる元素は土壌を構成している主要元素である Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, Mn, Fe などが大半を占める。また通常一般的な岩石や堆積物にはあまり含まれていない S がかなり多く溶脱されてくるのも注目される。溶脱されてくるその他の元素はきわめてわずかであるが、Loc. 1 で特に注目されるのは、Mn がやや多めであることである。また通常微量元素として扱わ

れる Zn や Sr、Ba が多少多めであるように思われる。本実験で用いた方法では通常の珪酸塩鉱物を分解するのは簡単ではないが、斜長石や水酸化物のような鉱物は溶解される可能性があり、Sr と Ba は長石由来であり、一方 Zn は水酸化物化した磁鉄鉱のようなものに由来している可能性がある。Loc. 2 の図 12-15 でわかるように地下 3m 程度から 5m 程度の間溶脱されてくる元素の量が少なくなっている地層がある。ここは福田層上部の風化砂岩の部分で、緻密で硬く固結している。そのため本地層からさまざまな元素が溶脱されにくかったのかもしれないし、また不透水層に近い状態になり、地下水は本地層の直上を地形に従って流下していった可能性もある。

これらいくつかの元素のうち特に有害と考えられる元素の分布を地層と対比して見た。カドミウムはすべての試料から検出されなかった。そこではじめに柱状図の上に溶脱されてきた砒素濃度の変化を表示した。この図は地層を構成している物質そのものに含まれている砒素濃度ではなく、主として各地層に吸着されている砒素の濃度変化と、変質鉱物や炭酸塩など強酸によって分解されやすい鉱物に含まれている砒素の総計を見ているものである。図 16 に溶脱されてくる砒素濃度の変化を示した。

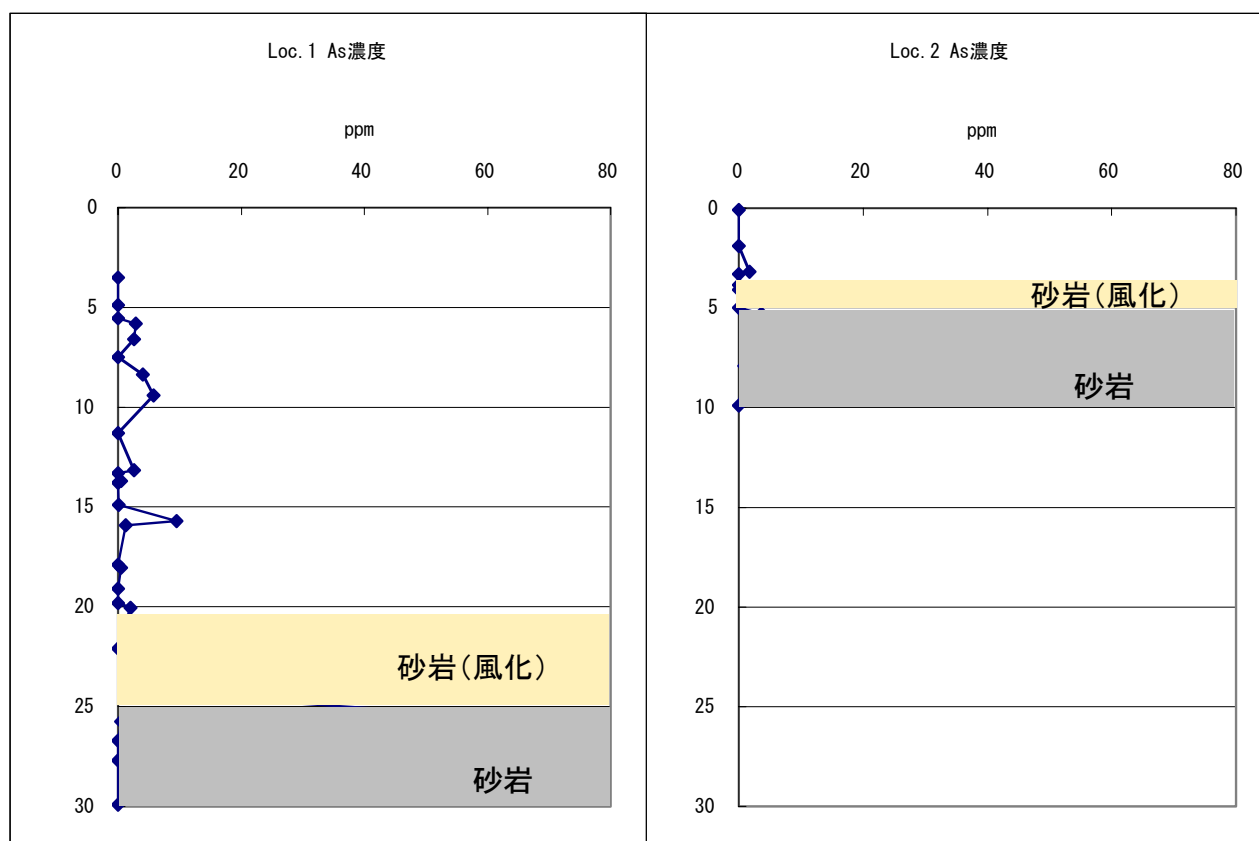


図 16 溶脱されてきた砒素濃度の変化

Loc. 2 の砒素濃度は非常に低く、この値と変化は自然のものであると思われる。Loc. 1 も 25m 地点までは非常に砒素には乏しく自然のものであり、この地域の土壌のバックグラウンドを示していると考えられる。水を通しにくいと思われる風化砂岩層の直下にやや砒素の多い部分がみられる。25m までの深さでも地形的に直近の上位に処分場があり、もし処分場に砒素を含む廃棄物が投棄され、それが溶けて流出していたらそこまでの地層にも砒素はある程度含まれているに違いない。しかし図 16 から明らかなように、25m 地点までの砒素濃度とその変化は自然のバックグラウンドとしか思えない。不透水層的な役割を果たしていると考えられる風化砂岩層の下で砒素濃度が上昇しているのは、上位の地層からプルームのように砒素が拡散していったものとは考えられない。Loc. 1 は地形的に谷底のような位置にあり、透水性の良い砂岩層中を地下水が流下して調査地点に砒素が集まったと考えられるが、その砒素の由来は一義的に決めることはできない。透水性の良い砂岩層中の砒素を地質学的な時間をかけて集めたものであるかもしれないし、またかつて農林業の薬品として用いられた砒素がこのような地層中に残留しているのかもしれない。

以下の図 17 と 18 に溶脱されてきた硫黄と銅の濃度変化を示す。Loc. 2 はどの位置でも硫黄の濃度がほぼゼロであり、これが自然に残留している硫黄の濃度と判断される。一方 Loc. 1 では数 m あたりから 20 付近ま

で硫黄の濃度が非常に高く、3000-4000 ppm程度硫黄を吸着している部分もある。これは基本的に廃棄物中

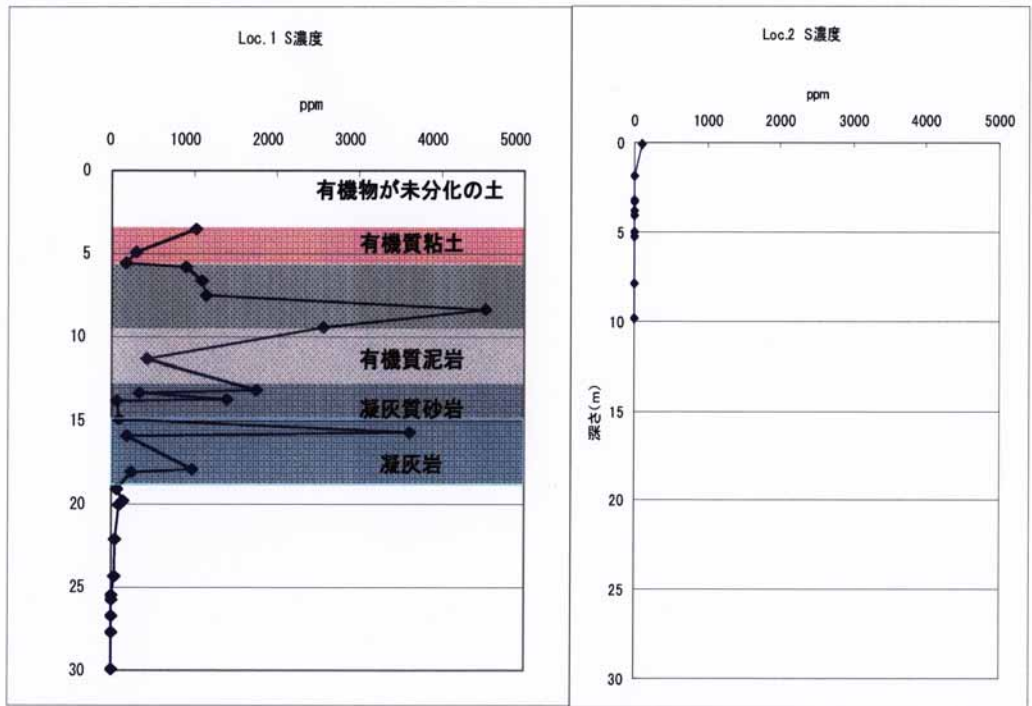


図 17 溶脱されてきた硫黄濃度の変化

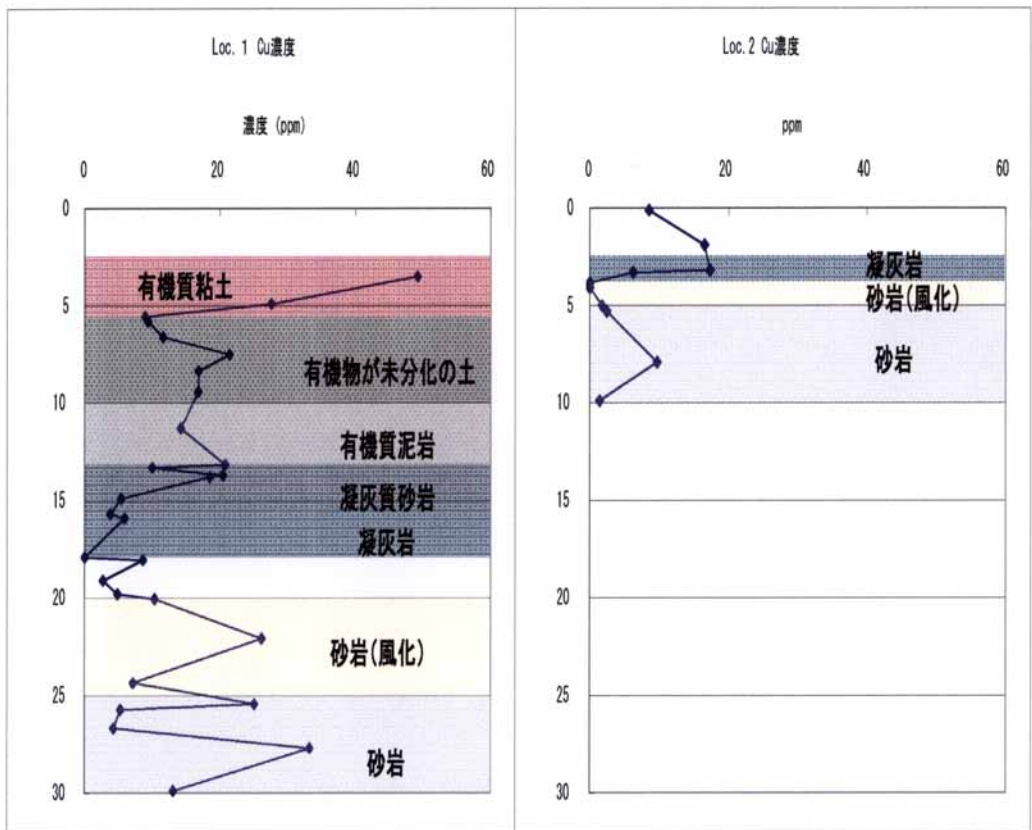


図 18 溶脱されてきた銅濃度の変化

に建築廃材の石膏ボードが含まれていたためであろう。但し図 16 で 25m という深い位置に砒素をやや多く吸着している地層がみられたが、硫黄は 20m 以深では Loc. 2 とほとんど同様の吸着量になってしまい、地下深部にブルームのように拡散していない。この結果から判断する限りでは、硫黄は埋設された位置から同じ層準の下部には移動が起こるものの、下部地層に向かって拡散しているとは考えられず、Loc. 1 で 25m 付近にあるはずの地下水を通しにくい地層までも達していない。これに対して図 18 で見られるように銅は大変複雑な分布を示している。Loc. 2 の銅の濃度変化が調査地域一帯の自然の値であるとする、Loc. 1 で見られる値とその変化は自然のものと大きな変化はない。両地点での値は自然の値よりもやや高いように見えるが、かつて銅は農林業用の薬品として使われていたことを考えると、多少は多くても不思議ではないが<sup>7) 8) 9)</sup>、にみられるように、堆積岩中の銅またはそれに吸着されている銅の量として特別異常であるということはない。むしろこの図から言えることは、硫黄の非常に多かった深度に相当する地層に吸着されている銅の量は、比較的水を通しにくい風化した砂岩層より明らかに少なめで、これらの銅が廃棄物由来とは考えにくい。もし廃棄物由来の銅がブルームのように地層の下方に広がったならば、拡散しながら濃度的には低くなりながら地層中に広がるはずであるし、約 25m の深度にある地下水を通しにくい地層の位置でいったん滞留する状態ができるはずであり、その位置で濃度の上昇が考えられるが、それは見られない。以上のことから考えて、ここで得られた銅の深度分布は自然の状態のものと推定されるが、それに若干の農林業用の薬品に由来

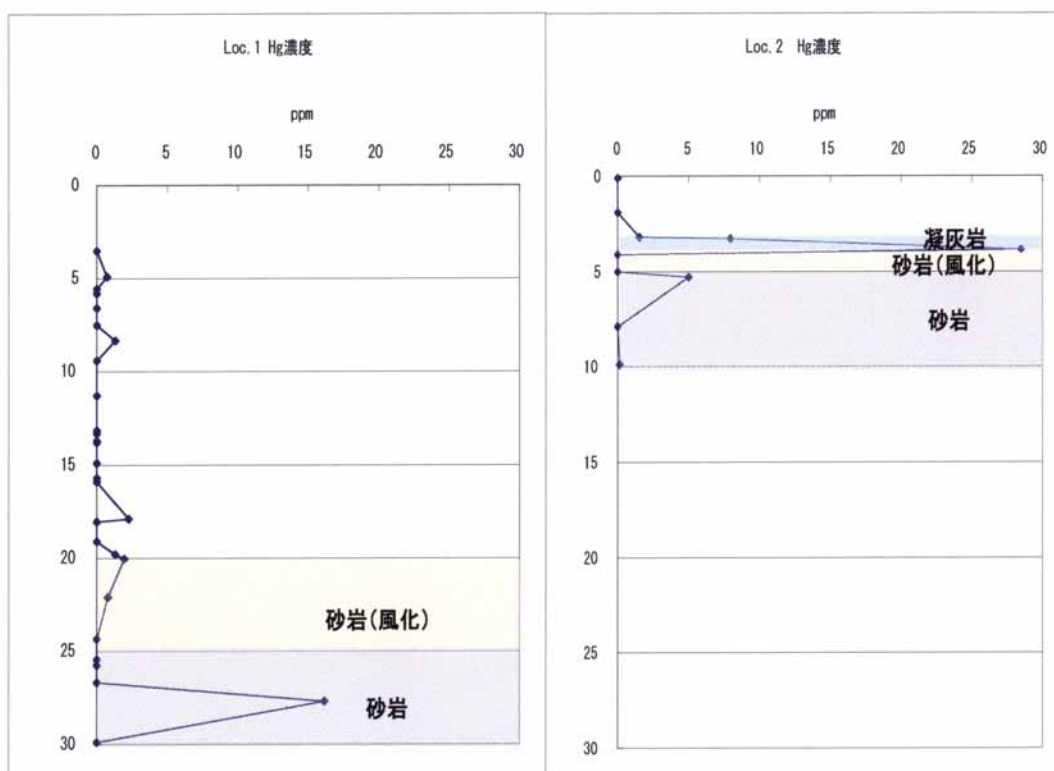


図 19 溶脱されてきた水銀濃度の変化

する銅が混入している可能性もある。ただし今回調査した 2 地点とも、吸着されている銅の量としては異常に多いわけではなく、自然由来の濃度とほとんど変化はない。

当処分場に廃棄されたものがどのようなものであるか最終的にわからなくなっているため、図 19 に用脱されてきた水銀の濃度変化を示した。分析値の表からもわかるように、水銀の値はきわめて低く自然の値と変わらない。但し、Loc1. の 25-30m の深さの砂岩層と Loc2. の風化砂岩層の上の凝灰岩層からはやや多く溶脱されてきた。しかし、廃棄物を埋設した位置に相当する深さの地層からは自然堆積岩と大きく異なるような濃度水銀は検出されなかった。廃棄物中に水銀が含まれており、それが溶脱されると、地下水によって横方向の下流に移動するか、上方から浸透してきた地下水によって下方にブルーム状に拡散すると考えられるが、2 地点で見られる水銀の深さ方向の分布はこのようなモデルでは説明できない。Loc. 1 で見られた砂岩中の水銀の濃集は、上方から浸透した水が、その水を通しにくい風化砂岩層を通過して形成したものとは考えにくい。一方で Loc. 2 の廃棄物処分場からは何もきていないと考えられる凝灰岩層に水銀が集まっている。

その凝灰岩の下は水を通しにくい風化した砂岩層である。この位置に水銀が自然に集まる理由は全くなく、またさらに、地下水が下位から上位に移動する極度の蒸発に伴う特殊な事態がおり、廃棄物に由来する水銀が集まったものとも考えられない。この水銀もかつて農業用薬品として用いられていたものが、依然として土壤中にトラップされたままになっていたものと考えられる。

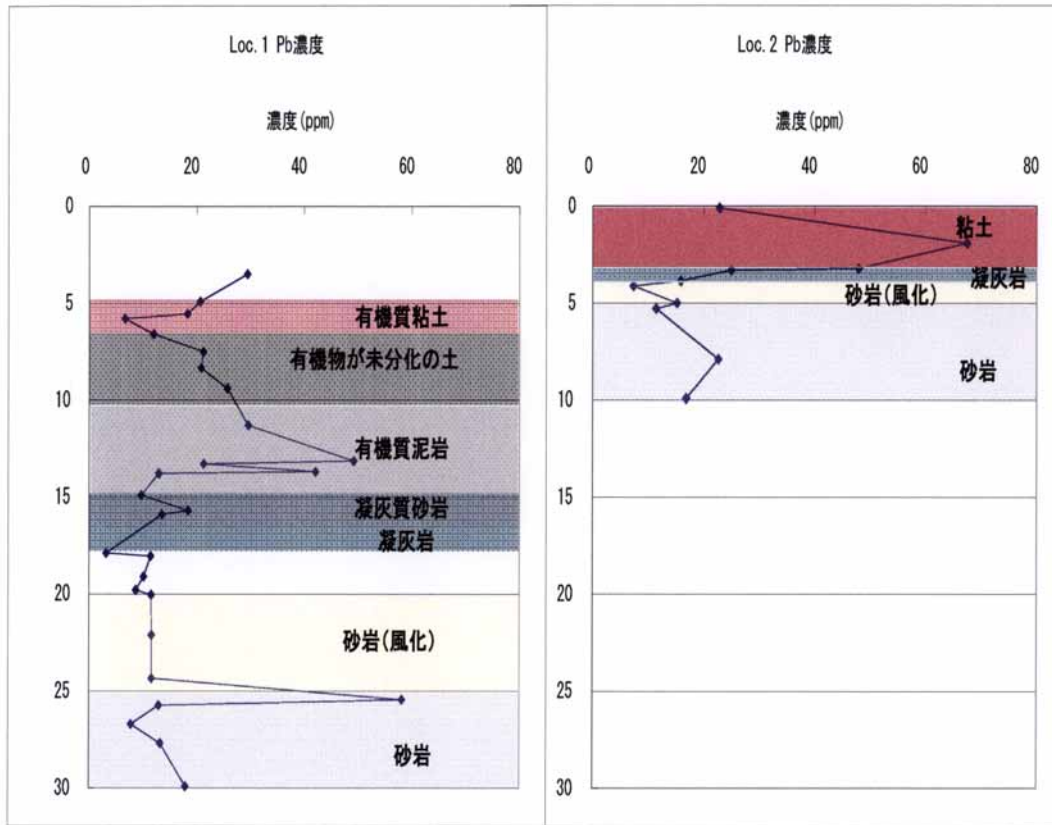


図 20 溶脱されてきた鉛濃度の変化

図 20 に溶脱されてきた鉛の濃度変化を示した。堆積岩中の鉛の濃度は例外的なものをのぞいて ppb レベルから、20ppm 以下程度である<sup>7) 8) 9)</sup>。Loc. 2 の砂岩と風化砂岩に吸着されている鉛はおおよそ調査地域の自然のバックグラウンドを示しているとみなすことができる。しかし、その上の表層部は明らかに吸着されている鉛の量が多くこれを自然の鉛であると考えerるには説明を要する。一部の長石などは鉛を含みやすく、これらの鉱物が風化分解すれば多くの鉛がさまざまな鉱物に吸着されている地層ができあがっても不思議ではない。本実験では有機鉛と無機鉛を区別して分析してないものの、Loc.2. でみられる鉛の多い部分が自然のものではなくかつて長期間にわたってガソリンに添加されていた鉛が残留していたものであろう。同様に Loc. 1 の 25m 程度の深さでみられる吸着されていた鉛の多い地層も、同じ理由で鉛が多くなっているものと判断される。こちらの場合は遠方で地表に露出している砂岩中に人為的に利用された鉛が浸透し、地層の傾きに従って現在の位置に集められたものであろう。一方、廃棄物が埋設されている深さに相当する地層は 12-13m を中心に明らかに鉛の濃度が高くなっている。17-18m 以下の地層には 10ppm 程度の鉛しかなくこれはほとんど自然のバックグラウンドとみなせるが、その上位にある鉛の濃度の高い部分はほぼ正確に硫黄の多い部分と一致し、廃棄物由来であるという可能性は否定できない。12-13m あたりの深さでもっとも吸着量が多くなり、そこから下方に向けて濃度が低くなってゆくがこれは、プルーム状に鉛が広がっている可能性が全くないとは判断できない。もしプルーム状に鉛が広がっていると、水を通しにくい風化砂岩と砂岩の境界あたりでいったん停止し、さらにその下方にプルームを広げてゆく可能性がある。その場合は図 20 の Loc. 1 のような分布形態を取る可能性がある。廃棄物由来の鉛のプルームができつつあるとすると、前述の人為的鉛の濃集結果を見ているわけではないことになる。しかしながら廃棄物が埋設されている位置と溶脱されてくる鉛の多い部分が大体一致すること、またこれは硫黄の多い部分とも位置することを考慮すると、溶脱された鉛が地下水によって、地層の傾きに従って流下したと考えるのが適当であろう。

大局的に見て Loc. 1、Loc. 2、ともに、地層境界の直上の土壌でさまざまな元素が多く吸着され濃度が高く



なっている。Loc. 1 では、泥岩直上の有機物が未分解の土、凝灰岩直上の泥岩、砂岩の上の風化砂岩で、主に Fe、Mn、Al、Ca の濃度が高くなっている。Loc. 2 では、砂岩上部の風化砂岩で Fe、Mn、Cu、Ca、Pb の濃度が高くなっている。また、Loc. 1、Loc. 2 ともに粘土層中で Fe、Mn、Al、Cu、Pb などの元素の濃度が高く、砂岩中にも元素の濃度が高い箇所がみられる。As 濃度は Loc. 1 の砂岩層の、砂岩層と風化砂岩の層の境界付近で急激に高くなっていた。Cu 濃度は Loc. 1 の有機質の粘土層で最も高い値を示していた。それ以外の層では、有機物の多い層と砂岩層及び風化砂岩の層で多くなる傾向にあった。Hg 濃度は Loc. 1 の砂岩層で非常に高い値を示した。Loc. 2 では、凝灰岩層で、風化砂岩との境界付近のところの濃度が非常に高い値を示した。Pb 濃度は、Loc. 1 の有機物の多い土の層と、Loc. 1 の砂岩層で風化砂岩との境界付近のところで高い値を示した。また、Loc. 2 では、粘土のところで高い値を示した。

## 6.2 水試料中の元素濃度

水試料は 2003 年の秋 1 週間以上雨の降らないときに採水した。試料の pH はそれぞれ、WR1 が 7.8、WR2 が 7.9、WR3 が 7.8、WP1 が 9.3、WP2 が 9.1、WP3 が 8.6、WH が 8.3 でほとんど中性から弱アルカリ性であった。しかし WP1、WP2、WP3 薬品によって処理が行われた後であると考えられる。

本分析は状態分析を行っていないので、これらの元素がどのような化学形態を持っているのかは不明である。しかしいくつかの元素については、クロマトグラフィーなどでおよその化学形態がわかっているものもあり、それは別に報告する予定である。まず、PIXE での分析結果のうちいくつかの注目した元素濃度を表 10 に示す。主要な元素は、Na や Ca で、処理池の Na 濃度はヒューム管や川の Na 濃度の 5～10 倍の値を示していた。また、As、Cr、Cu、Hg、Pb の濃度を図 20 に示す。Cd は検出されなかった。処理用の池の Pb と Cr と Hg の濃度が川の濃度よりも、2～3 倍高かった。全体的にそれぞれの濃度は処理池の方が川よりも高いという傾向にあった。Cu 濃度と Pb 濃度はヒューム管でも比較的高い値を示した。

表 10 処分場周囲の浸出水と沢水、河川水のいくつかの元素濃度 (mg/l)

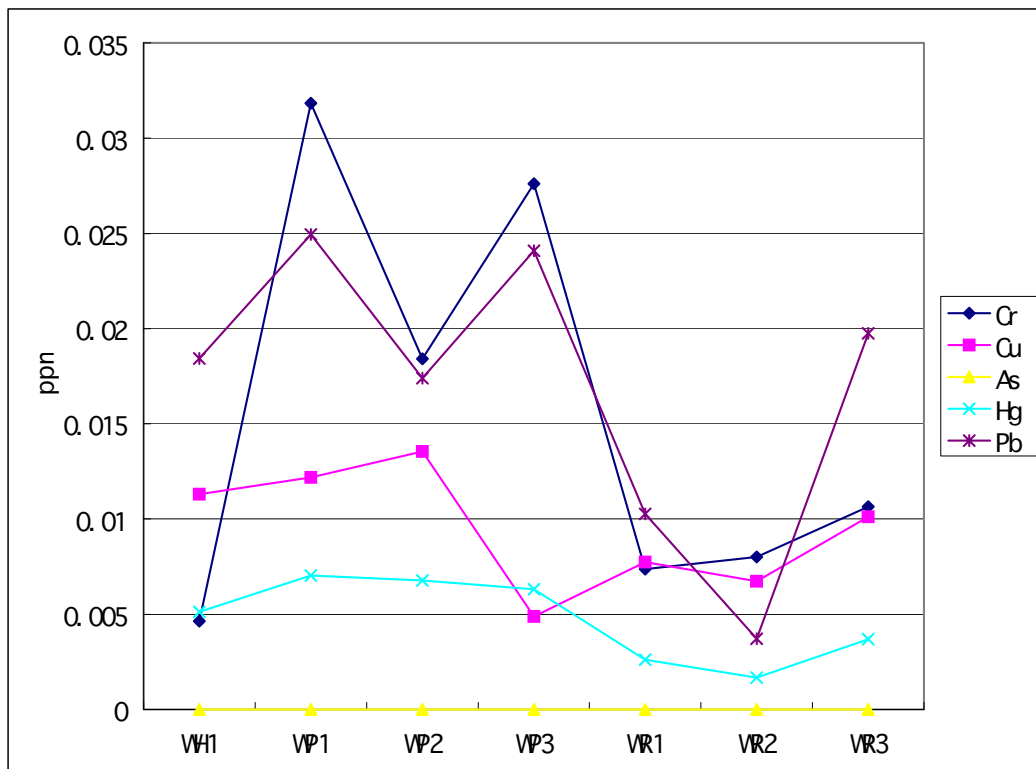
	WH1	WP1	WP2	WP3	WR1	WR2	WR3
S	52.692	52.629	40.427	38.023	11.957	7.359	10.190
Cr	0.005	0.032	0.018	0.028	0.007	0.008	0.011
Cu	0.011	0.012	0.014	0.005	0.008	0.007	0.010
Zn	0.014	0.006	0.010	0.019	0.013	0.005	0.011
As	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Se	0.003	0.005	0.001	0.005	0.002	0.000	0.000
Hg	0.005	0.007	0.007	0.006	0.003	0.002	0.004
Pb	0.018	0.025	0.017	0.024	0.010	0.004	0.020

表 10 で明らかのように、処理されているとはいえ処理用の池 3 つからの水は (WP1、WP2、WP3) 硫黄をたくさん溶かしこんでいる。これに比べて河川水 (WR1、WR2、WR3) は 4 から 5 分の 1 程度の硫黄しか含んでいない。ここで不思議な値を示したものは WH1 という試料で、これは処分場の上位から流れてくる沢水を、処分場に浸透しないようにするためヒューム管を通して排水しているものである。しかし、処分場からの浸出水と同じかそれ以上の硫黄を含んでいるのは説明が困難である。もともと分析にもちいた沢水が硫黄に富んでいたのかもしれない。周辺の土壌にはほとんど見られなかったのと同様に Cr などが河川水とほとんど同じか、それ以下であること、また銅や鉛等も河川水に含まれているのと同様であることを考えると、廃棄物処分場の浸出水がヒューム管のたとえば亀裂のような部分から入り込んでいるとも思えない。これらの分析結果は硫黄を除いて、そのような可能性がないことを示している。図 16 でも砒素はほとんど溶脱してこないことを示したが、浸出水、沢水、河川水の中にも非常に少なく 0.000mg/l 以下であった。検出はされているが、極微量なのでここで示した桁数ではすべてゼロになってしまう。

本実験で用いた土壌からは分析可能な量のクロームは溶脱されてこなかった。そのため土壌から溶脱されてきた元素の分析値にも示していないし、また分布の変化図にも示していない。一方、処理用の池の水 (WP1、WP2、WP3) からは微量ではあるが明らかに周囲の河川よりも多くのクロームが検出・分析された。第 3 処理池 (WP3) になってもあまり減少はしていない。なぜ地下水によって運搬され土壌に吸着されないのか、またどのような廃棄物由来であるかは不明である。これに対して鉛は図 20 にも示したように、極微量ではあるが廃棄物から溶出し、地下水によって周囲の土壌にひろがりつつあるのと同様に、処理用の池の水にも極微量

検出された。ここでもし WR1, WR2, WR3 が調査地域のバックグラウンドであるとする、WR3 は WP2 よりも多くの鉛を含んでおり、自然の値を大きく超えているとはいいたい。これらの結果を図 21 に示した。縦の目盛りが mg/1 なので極微量な部分が極度に拡大されて図化されているが、それぞれの水の各元素濃度変化が良好

図 21 ヒューム管からの排水と処分場からの浸出水、河川水の元素濃度



く見える。図 21 はきわめて低い濃度が部分を強調されすぎているものの、全体的には浸出水処理用の池で Cr, Pb, Cu などの濃度が高いことが明らかである。しかしこれらの数字は水質汚濁防止法の一律排水基準以内であり、特に問題とすべき状況にはない。砒素は図 21 のようにほぼゼロとみなしてよいと思われる。問題を指摘するとすれば 1 点だけで、処理場になっている 3 つの池のみずである。WP1, WP2, WP3 ともすべて水銀を 0.005mg/1 含んでおり、一律排水基準ををこえている。これもしかし、特に雨が降らない日が続いた後に採水をしたためである可能性があり、採水を継続した場合はどのようなになるか不明である。

## 7. 考察

### 7.1 地下水の流動

まず始めに、処分場の側から水が湧き出していることから、この処分場には多くの地下水の流動経路が存在していると考えられる。地形および標高差から、地下水は Loc. 2 から Loc. 1 の方へ流動しているはずであり、地下の廃棄物は両者の間にあるので、廃棄物から重金属等の汚染物質が溶出しているとするれば、その汚染物質は Loc. 1 の方へ移動すると考えられる。Loc. 1 の柱状図を構成している堆積物には、地下で何がおきているかを化学的に記録しているはずである。

### 7.2 重金属等の汚染物質の挙動および汚染状況

土壌試料の PIXE 分析の結果から Loc. 1 の砂岩層と Loc. 2 の砂岩層それぞれの濃度の平均を取ったものを比較したものと、Loc. 1 の風化砂岩層と Loc. 2 の風化砂岩層それぞれの濃度の平均を取ったものを比較したところ、Loc. 1 の重金属濃度は、Loc. 2 の重金属濃度よりも高い値を示した。Hg 濃度、Pb 濃度は砂岩層でも風化砂岩層でも Loc. 1 の値と Loc. 2 の値にそれほど変化が見られなかった。As 濃度も、風化砂岩では Loc. 1 と Loc. 2 の値にそれほど差が見られなかったが、砂岩層では、Loc. 1 の濃度が Loc. 2 の濃度の 8 倍の値を示した。また、Cu 濃度は風化砂岩層、砂岩層、ともに、Loc. 1 の濃度が Loc. 2 の濃度を大きく上回っており、それぞ

れ 18 倍、3 倍であった。地下水は傾いている地層に沿って Loc. 2 から Loc. 1 の方向に流れていることから、濃度の増加部分は Loc. 1 と Loc. 2 の中間に埋め立てられている廃棄物から流出してきた可能性を完全に否定することはできないが、不透水層に近い役割を果たしている風化砂岩を通過して浸透して下部の地層に移動していったとは考えにくい。吸着された硫黄の分布ににられるように、今回の調査地域では風化砂岩層の上を地下水に溶けて流動していったと考えるのがもっとも自然である。

有害物質とされる As、Cu、Hg、Pb 濃度に関しては、本研究と同じ強酸分解法を用いて元素を溶脱させているスイスとドイツの基準値を用いることとする<sup>10)</sup>。Hg 濃度については、Loc. 1、Loc. 2 で濃度の差はあまり大きくなかったが、ともに、スイスやドイツの土壌中の Hg 濃度の基準値を大幅に越えている。Pb 濃度についても同様で、Loc. 1、Loc. 2 の濃度差がほとんどなく、ともにスイスやドイツの基準値を少し超えている。これらは、鉛添加ガソリンのような人為的なものに由来する可能性が高いものと思われる。しかし、いったん土壌に混入した重金属は土壌への吸着力が強く容易には溶脱されず、10～1000 年のオーダーで滞留することから、今では使われなくなったヒ酸鉛や水銀農薬等の農薬が長い間土壌中に滞留していた可能性も考えられる。

処理池の Pb や Hg 濃度が河川水よりもかなり多かったことから、これらは処分場から溶出してきたものと思われる。Hg の濃度はわずかであり、1 回だけの測定という問題はあるが一律排水基準をわずかに超えて高い値を示している。

以上より、土壌中の重金属の挙動についてまとめると、次のようになる。

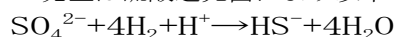
廃棄物処分場の一帯の地層中にはもともと人為的な Hg や As が濃集しており、それが溶出し、帯水層を通過して移動している。As や As は廃棄物から溶脱している可能性がほとんどなく、その濃度は深刻な値ではない。ヒューム管を流れる本来沢水と考えられているものは、廃棄物堆積物と完全に遮断されているはずなのに Cu や Cr、Pb が異常におおいという傾向がある。この原因は不明であり、廃棄物処分場由来のものが混入しているとすると説明のつかないことがいくつもある。

### 7.3 現在の廃水処理の問題点

処理用の 3 つの池の Pb、Hg 濃度は、ドイツ・スイス等の国の厳しい環境基準をわずかに超えており、しかも、3 段階にわたって重金属を沈澱させて汚水を浄化しているにもかかわらず、最後の段階においても Pb、Hg 濃度はそれらの基準値を超えている。このことから、Pb、Hg 濃度の高い水が川に流されている可能性が考えられる。これらのことから、処理池の水は十分浄化されないうちに流されている可能性が高いが、汚染の程度は非常に低く廃水処理をきちんと行えば大きな問題が起きる前に解決されると期待される。

## 8. まとめ

H<sub>2</sub>S の発生は硫酸還元菌により以下の反応が起こっていると思われる<sup>11) 12) 13)</sup>。



また、発生した H<sub>2</sub>S や、その酸化又は硫黄酸化細菌の



の反応により生成した硫酸によって廃棄物が溶かされている可能性がある。しかし、土壌から溶脱される溶液中の重金属等の濃度は、Hg、Pb を除いて、基準値を上回る値は示さなかった。Hg、Pb については、自然または歴史的由来を持っているものも含まれている可能性は否定できない。処理池に貯めた水については、3 段階に渡る浄化処理を行っているにもかかわらず、3 つめの処理池においてもまだ、Hg、Pb 濃度は基準値を超えている。

以上より、処分場地下の土壌及び地下水は Hg や Pb によって徐々にではあるが汚染されはじめているものと思われる。しかしそれがすべて廃棄物由来であるかはわからず、かつてガソリンに用いられた Pb や農薬に用いられた Hg さらには Cu を含んでいる可能性は否定できない。また、処理池により処理された水は渇水期には十分な浄化が行われずに川に流されている可能性がある。処分場から地下水に溶けて手の施しようのないほどまでに周囲の地層を汚染する前に、なんらかの対策をとるべきであろう。

## 9. 謝辞

本研究を進めるにあたり、岩手医科大学サイクロトロンセンターには PIXE 分析についてご指導・ご協力を頂きました。そして、東北大学大学院理学研究科地学専攻の構成員には、試料の採取、分析についてお世話になりました。以上の方々に深く感謝しております。

## 引用文献

1. 旧厚生省水道環境部産業廃棄物対策室：「廃棄物最終処分場における硫化水素対策検討会報告書骨子」旧厚生省情報。(2000)。
2. 村田町竹の内地区産業廃棄物最終処分場対策調査検討会：「竹の内産業廃棄物最終処分場における硫化水素発生原因等調査報告書の概要」環境生活委員会配布資料：(2003)。
3. 宮城県：土地分類基本調査、「白石」5万分の1(1983)。
4. Sera, K and S. Futatsugawa, :A few approaches to remove ambiguous factors in X-ray spectrum analysis, Int. J. PIXE, 3, 283-294. (1993).
5. Sera, K. and S. Futatsugawa, : Personal computer aided data handling and analysis for PIXE, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., B. 109-110. 99-104, (1996).
6. 田中 晃, 渋谷 靖弘:「明石水系の河川底質の重金属汚染度」、岩石鉱物科学、Vol. 31, p. 174-186, (2002)
7. Imai, N. : Multielemental analysis of rocks with the use of geological certified reference material by inductively coupled plasma mass spectrometry, Anal. Sci., 6, 389-395, (1990)
8. Imai, N., S. Terashima, S. Itoh, and A. Ando., :1994 compilation of analytical data for minor and trace elements in seventeen GSJ geochemical reference samples ” Igneous rock series, Geostandard newsletters, 19, 135-213, (1995)
9. Imai, N., S. Terashima, S. Itoh, and A. Ando., :1998 compilation of analytical data for five GSJ reference samples: The instrumental analysis series” . Geostandard Newsletters, 23, 223-250, (1999)
10. L. Denaix , R. M. Semlali , F. Douay Dissolved and colloidal transport of Cd, Pb, and Zn in a silt loam soil affected by atmospheric industrial deposition, Environmental Pollution ,Vol. 113, p. 29-38, (2001):
11. Satoshi Okabe , Tsukasa Itoh , Hisashi Satoh: Analyses of spatial Distribution of sulfate-reducing bacteria and their activity in aerobic wastewater biofilms, Applied and Environmental Microbiology, Vol. 65, p. 5107-5116, (1999)
12. 山中 健生 (2003) :「環境にかかわる微生物学入門」、講談社サイエンティフィック
13. 山中 健生 (1986) :「微生物のエネルギー代謝」、学会出版センター