

## 6 研究活動報告

環境科学国際センターでは様々な調査研究活動を実施している。それらの成果については積極的に発表し、行政、県民、学会等での活用に供している。学術的な価値のあるものについては論文にまとめて学術誌へ投稿することにより発表しているが、それ以外にも比較的まとまった成果は多い。ここではこれらの調査研究成果のうち、論文や種々の報告書に掲載されていないものを紹介する。今号では、当センターで研究活動を実施しているもののうち、令和5年度に取りまとめた成果や情報について報告する。

### 6.1 総合報告

ストリップングボルタンメトリーによる土壌中重金属のオンサイト分析法の開発……………石山高

### 6.2 資料

令和6年能登半島地震被災地における避難所運営支援業務と在宅避難者の生活用水確保行動調査……………柿本貴志

[総合報告]

# ストリップングボルタンメトリーによる 土壌中重金属類のオンサイト分析法の開発

石山高

## 要 旨

近年、土壌汚染は顕在化する傾向にあり、今では大きな環境問題となっている。土壌汚染対策には膨大なコストを要することが多いため、対策コストを削減するには簡易迅速な土壌汚染調査で汚染範囲を把握しておくことが必要である。現在、様々な簡易迅速分析法が土壌汚染分析に使用されている。ストリップングボルタンメトリー(SV法)は、高感度な電気化学分析法であり、多くの汚染現場で活用されている。

著者は、SV法を適用した土壌中有害重金属類(鉛やカドミウムなど)を対象とした簡易迅速分析法を開発した。また、開発した簡易分析法を埼玉県内の土壌汚染調査に使用し、その信頼性を確認するとともに対策の低コスト化に貢献した。更に、開発した方法の社会実装化についても検討した。土壌汚染範囲の絞り込みによる処理対策の低コスト化は、土地所有者に対する経済的負担を軽減するばかりでなく、土地開発や都市開発の活発化にも寄与する。

キーワード: 簡易迅速分析、ストリップングボルタンメトリー、重金属類、土壌汚染

## 1 はじめに

近年、土壌汚染は顕在化する傾向にあり、現在では大きな環境問題の一つとして注目されている。環境省の調べでは<sup>1)</sup>、令和元年度までに全国で約36,000件の土壌汚染調査(法対象外も含む)が行われ、半数近い約16,000件で環境基準の超過が報告されている(図1)。基準超過項目としては、土壌粒子に吸着しやすい重金属類が非常に多く、鉛(Pb)、ふっ素(F)、砒素(As)、六価クロム(Cr(VI))などによる汚染が数多く報告されている。県内でも毎年多数の土壌汚染調査が実施されており、令和3年度に行われた要措置区域等指定に関する土壌汚染調査は59件と全国で7番目に多い事例数となっている。

埼玉県環境科学国際センターは、平成12年(2000年)4月1日に開設された。当センターでは、開設後まもなく施行される

土壌汚染対策法(市街地土壌汚染を規制:平成15年(2003年)2月15日に施行)に着目し、全国の公設研究機関に先立ち、土壌汚染問題に取り組むプロジェクトチーム(土壌地下水汚染対策チーム)を開設と同時に結成した。本プロジェクトチームには、各担当(水環境、地質地盤・騒音振動、廃棄物管理、化学物質)から専門性の異なる複数の研究員が参加し、土壌汚染や地下水汚染に関する調査や研究を進めてきた(図2)。

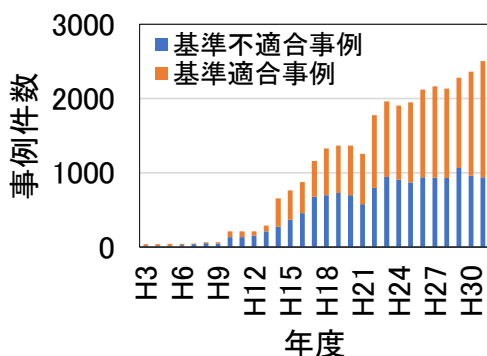


図1 年度別の土壌汚染調査事例(環境省調べ)<sup>1)</sup>

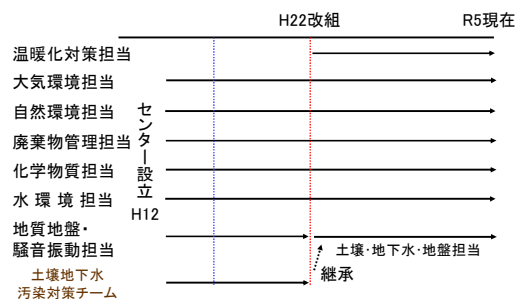
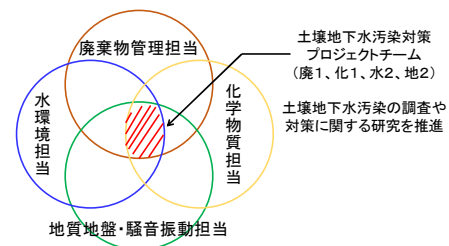


図2 土壌地下水汚染対策チームの構成メンバーと変遷図

本プロジェクトチームは、当センターの組織改編(平成22年)に伴って解散となり、土壤汚染に関する調査及び研究業務は、現在の土壤・地下水・地盤担当に引き継がれている(図2)。

土壤汚染対策を実施するには、土壤汚染対策法に基づく土壤汚染調査を通じて汚染範囲を事前に把握しておく必要がある。しかし、公定法による土壤汚染調査には多大な手間と時間を要するため、汚染範囲を詳細に把握することは非常に困難であった。その解決策として、環境省は「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(改定第2版)<sup>2)</sup>」で、汚染範囲を詳細に絞り込むための簡易分析の利用を認めているが、具体的な分析方法については明記していない。土壤地下水汚染対策チームでは、このような社会状況を踏まえ、基準不適合事例の約7割を占める重金属類を対象とした簡易分析法の開発に取り組んだ。本研究業務では、センター自主研究予算のほか、日本学術振興会の科学研究費補助金や民間財団による競争的研究予算を活用するとともに、開発した分析技術を実際の行政施策に活用して県内で発生した土壤汚染の対策コストを大幅に削減することに成功した。更に、開発した分析技術の社会実装化を目指すため、県内の分析機器製造企業と共同研究を実施し、多くの計量証明事業所や環境コンサルタントなどにも積極的に技術移転を試みた。

著者は、平成15年(2003年)4月に当センターに着任すると同時に土壤地下水汚染対策チームに参加し、土壤中重金属類の簡易分析法の開発に研究代表者として取り組んできた。本総合報告では、同チームが解散するまでの7年間に著者が携わった研究内容について簡単に整理するとともに、県行政施策への活用事例について紹介する。過去に実施した研究を整理する関係上、著者が発表した学術論文の内容や図表を一部転載することを事前に明記しておく。

## 2 土壤汚染調査手法

### 2.1 試料採取地点の設定と採取方法

土壤汚染対策法では、土壤汚染調査を実施する前に調査対象区域を ①土壤汚染のおそれが高いと認められる土地、②汚染のおそれが少ないと認められる土地、③汚染のおそれがないと認められる土地に分類する。汚染調査では、土壤試料の採取区画として30m四方の区画を設定し、これを10m四方の区画(単位区画)に9分割する(図3)。①の場合は単位区画の中心で土壤試料を採取して単位区画ごとに汚染の有無を判断し、②の場合は中心の単位区画と上下左右の単位区画から計5試料を採取し、これらを均等混合したものの分析結果から30m四方の区画全体の汚染の有無を評価する(5地点均等混合法)。③の場合は、汚染調査が免除される。①～③の分類は、事業所の設計図や有害物質を扱う施設の位置関係などを基に厳密に判定される。土壤汚染対策法では、深さ方向における試料の採取方法も規定されている。掘削採取した土壤試料を深度0～5cmまでの表層部分と5～50cmまでの下層部分に分別し、それぞれを等量混合したものを分析用の土壤試料とする(図4)。

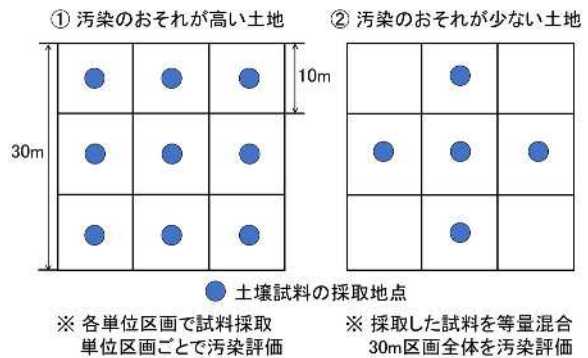


図3 土壤調査区画の設定と試料採取位置図

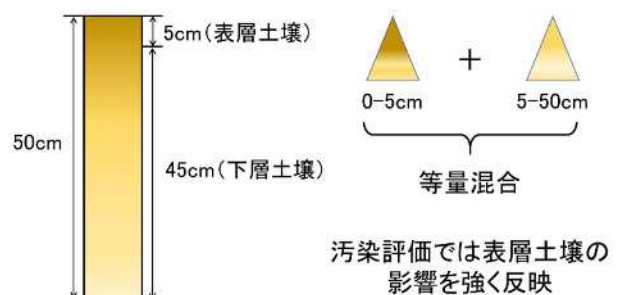


図4 深度方向における試料採取方法

### 2.2 土壤分析方法

土壤分析方法を図5に示す。土壤試料は、分析に先立ち、風乾(1週間前後を要する)を実施し、その後目開き2mmの篩で粒度調整する。重金属類を対象とした土壤汚染調査では、溶出量試験<sup>3)</sup>と含有量試験<sup>4)</sup>が規格化されている。前者は、土壤汚染を契機に生ずる汚染地下水を飲用することで発生する健康影響を評価するための試験方法であり、後者は汚染土壤を直接摂取することで生ずる健康影響を評価するための試験方法である。前者は地下浸透のしやすさを評価するため、汚染土壤の水溶出操作を行い、後者は体内暴露のしやすさを評価する目的から胃酸を模した希塩酸(1mol/L)で汚染土壤の抽出操作を行う。ただし、全シアン(CN)の分析では、溶出量試験、含有量試験のどちらも溶出や抽出操作の代わりに蒸留操作を行い、Cr(VI)の含有量試験では抽出溶媒に炭酸ナトリウム-炭酸水素ナトリウム混合液を用いる。溶出量試験では50g以上の土壤試料に対して重量体積比1:100の水を加え、含有量試験では土壤6gに対して重量体積比3:100の希塩酸を加える。水溶出操作は毎分200回で6時間、希塩酸抽出操作は毎分200回で2時間連続振とうする。振とう操作後は、3000Gで20分間遠心分離を実施し、上澄み液を0.45μmメンブレンフィルターでろ過を行う。JIS K0102 工場排水試験方法に準拠してろ液を分析する。

### 2.3 土壤溶出量基準と土壤含有量基準

表1に土壤溶出量基準値と土壤含有量基準値を示す。土壤汚染対策法では、第一種特定有害物質(揮発性有機化合物VOC)、第二種特定有害物質(重金属類)、第三種特定有害物質(農薬)が規制対象項目として設定されている。このう

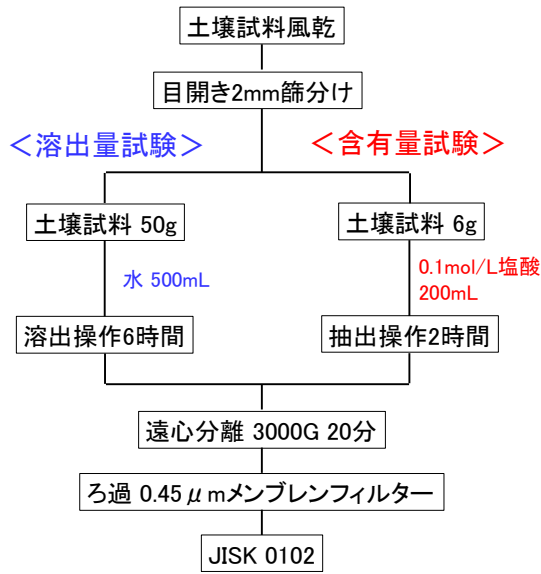


図5 土壌汚染の分析手法

表1 土壌溶出量基準と土壌含有量基準

分類	規制項目	溶出量基準 (mg/L)	含有量基準 (mg/kg)
第1種 特定有害物質	ジクロロメタン	0.02	
	四塩化炭素	0.002	
	クロロエチレン	0.002	
	1,2-ジクロロエタン	0.004	
	1,1-ジクロロエチレン	0.1	
	1,2-ジクロロエチレン	0.04	
	1,1,1-トリクロロエタン	1	
	1,1,2-トリクロロエタン	0.006	
	トリクロロエチレン	0.01	
	テトラクロロエチレン	0.01	
	1,3-ジクロロプロペン	0.002	
	ベンゼン	0.01	
	第2種 特定有害物質	カドミウム	0.003
全シアン		検出されないこと	50(遊離シアンとして)
鉛		0.01	150
六価クロム		0.05	250
砒素		0.01	150
水銀		0.0005	
アルキル水銀		検出されないこと	15
セレン		0.01	150
ふっ素		0.8	4000
ほう素	1	4000	
第3種 特定有害物質	チウラム	0.006	
	シマジン	0.003	
	チオベンカルブ	0.02	
	PCB	検出されないこと	
	有機リン	検出されないこと	

ち、土壌粒子に吸着しにくい第一種特定有害物質と第三種特定有害物質では土壌溶出量基準のみが設定されており、土壌粒子に吸着しやすい第二種特定有害物質では溶出量基準のほかに含有量基準も設定されている。土壌汚染対策法では、土壌溶出量基準と土壌含有量基準のどちらか一方でも超えた場合、汚染土壌と評価されて適切な対策が求められる。

### 3 簡易分析

#### 3.1 簡易分析導入の目的とその効果

図5の操作手順からも明らかのように、土壌汚染対策法で規定された土壌試料の採取・分析方法では多大な労力と時間を必要とし、これらの手法を用いて汚染範囲を詳細に絞り込むことは極めて困難である。特に、汚染現場で採取した土壌を研究所に持ち帰ってから汚染の有無を判断するやり方では、現

場と研究所を何往復もする必要が生じ、移動だけでも膨大な時間を要する(図6)。簡易分析の役割は、できるだけ簡単に短時間で汚染の有無を把握することにあるため、土壌調査で使用される簡易分析技術としてはその場で汚染の有無が識別できるオンサイト分析技術が有用である。

簡易分析の導入は、土壌汚染調査の省力化だけでなく、汚染範囲の絞り込みに伴う処理土量の削減にも大いに寄与する。例えば、公定法による調査では単位区画の中心点近傍(公定法に基づく試料採取地点)しか汚染されていない場合でも、土壌汚染調査の結果が土壌溶出量基準や土壌含有量基準を超えた場合、単位区画の全範囲を汚染土壌と評価する(図7)。また、公定法では表層部分(0~5cm)と下層部分(5~50cm)を等量混合するため、表層部分のみが極端に汚染されていた場合も分析結果は土壌溶出量基準や土壌含有量基準を上回ることもあり、そのような場合は汚染されていない下層部分も汚染土壌と評価される(図7)。簡便迅速な分析技術を導入することは土壌汚染の調査密度を高めることに繋がり、これにより汚染範囲を詳細に絞り込むことが可能となり、不要な土壌処理を回避することができる(図7)。汚染範囲の絞り込みによる処理対策コストの削減は、土地所有者に対する経済的負担を軽減するばかりでなく、土地開発や都市開発の活発化など社会的な波及効果も大いに期待できる。

このように、簡易分析技術の開発は大きな環境ビジネスに発展する可能性があり、土壌汚染対策法の施行とともに多くの民間企業や研究機関が土壌簡易分析技術(オンサイト分析技術)の模索と開発に力を注いできた。

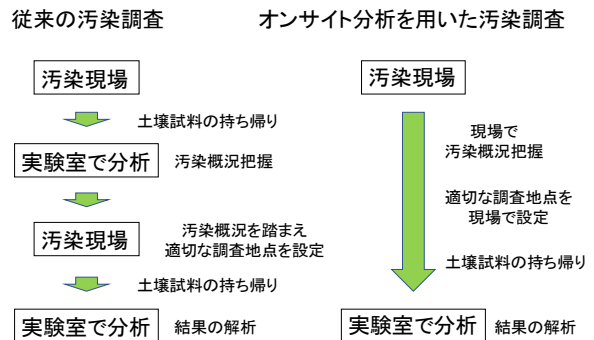
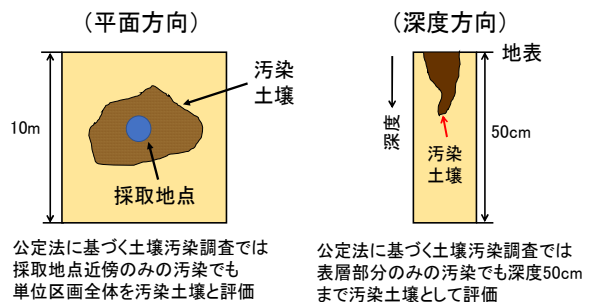


図6 土壌汚染調査の問題点(出典: 著者論文 No.1)



簡易分析により汚染範囲を絞り込むことで不要な土壌処理を回避

図7 簡易分析を用いた汚染範囲の絞り込み



### 3.2 ストリッピングボルタンメトリー(著者論文No.1)

ストリッピングボルタンメトリー(SV法)は、高感度な電気化学分析法である。この方法は、測定原理が簡単で排気施設など特殊な設備も必要ない。装置の小型化も可能であることから、著者らは、SV法を適用した土壌汚染調査の簡易分析手法を開発することにした。SV法の原理と特長を以下に解説する。

SV法は、電解液中の目的元素(主に重金属類)を一定電位で一定時間、作用電極上に電着させ、電解液を静置させた後、作用電極の電位を一定方向に走査して電着物質を溶出させ、その際に得られる電流-電位曲線(ボルタモグラム)のピーク電流あるいはピーク面積から目的元素を定量する(図8)。この分析法は、操作に濃縮過程が含まれているため、重金属類の高感度分析法として一般的に使用されている誘導結合プラズマ質量分析法(ICP/MS)に匹敵する感度を有している(図9)。また、溶出電位(電着物質が溶出する際の電位)が十分に離れていれば複数元素の同時定量も可能である。

SV法のなかでも作用電極の電位を正方向に走査して電着物質を溶出する方法をアノードックSV(ASV)、負方向に走査する方法をカソードックSV(CSV)と呼んでいる(図10)。また、電位を印加せずに電解液中の金属イオンと配位子を錯形成させ、これを作用電極上に吸着濃縮する方法を無電解濃縮SV(AdSV)と呼んでいる。AdSVを利用すれば、電気的に不活性な元素もSV法で定量することができる。このような様々な手法を組み合わせることにより、多くの重金属類に対する適用が可能となっている<sup>5-18)</sup>。このほか、溶出時のバックグラウンド電流を安定させる目的から、電着濃縮時と溶出時で電解液を交換する支持電解質溶液変換法という手法も用いられている。作用電極には、水素過電圧が高い水銀電極の他、酸素過電圧が高い白金電極、広い電位範囲で安定したバックグラウンド電流が得られるカーボン系の電極が利用されている。目的元素(分析対象の元素)のピーク電位を考慮して、最適な作用電極を選択する必要がある。

SV法は、測定原理が非常に簡単で装置の小型化も容易である。また、ICP/MSや原子吸光分析法(AAS)と比べて分析装置も安価である。国内でも、いくつかの電気分析機器メーカーがSV分析装置を製造及び販売している。

SV法の原理や特長、マトリックス元素の妨害抑制手法などについては、著者が整理した解説書<sup>19)</sup>で紹介しているので、

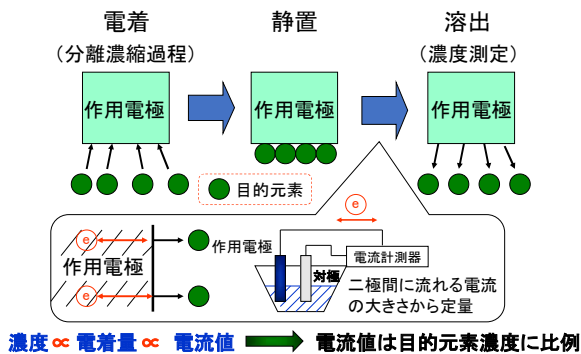


図8 SV法の測定原理(出典:著者論文No.1)

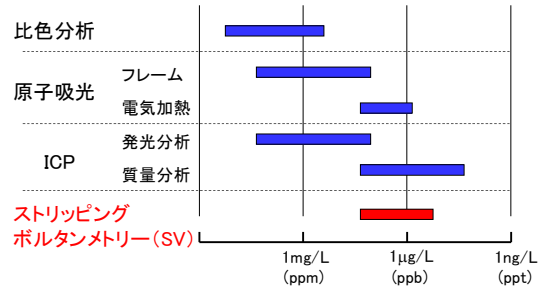


図9 各種分析法の定量感度(出典:著者論文No.1)

種類	元素	作用電極	電極反応式
アノードック ストリッピング ボルタンメトリー (ASV)	Cu <sup>2+</sup>	GCE* 水銀	$Cu^{2+} + 2e \xrightarrow{\text{電着}} Cu$ $Cu \xrightarrow{\text{溶出}} Cu^{2+} + 2e$
	As <sup>3+</sup>	金	$As^{3+} + 3e \xrightarrow{\text{電着}} As$ $As \xrightarrow{\text{溶出}} As^{3+} + 3e$
カソードック ストリッピング ボルタンメトリー (CSV)	Cl <sup>-</sup>	銀	$Cl^{-} + Ag \xrightarrow{\text{電着}} AgCl + e$ $AgCl + e \xrightarrow{\text{溶出}} Cl^{-} + Ag$
	Pb <sup>2+</sup>	白金	$Pb^{2+} + 2H_2O \xrightarrow{\text{電着}} PbO_2 + 4H^{+} + 2e$ $PbO_2 + 4H^{+} + 2e \xrightarrow{\text{溶出}} Pb^{2+} + 2H_2O$
吸着ストリッピング ボルタンメトリー (AdSV)	Metal <sup>n+</sup>	水銀	$M^{n+} + nL^{**} \rightarrow ML_n^{n+} (Ads)$
			$ML_n^{n+} (Soln) \rightarrow ML_n^{n+} (Ads)$
			$ML_n^{n+} (Ads) + me \xrightarrow{\text{溶出}} ML_n^{(n-m)}$

\*GCE グラシーカーボン電極 L\*\* 配位子

図10 SV法の種類(出典:著者論文No.1)

こちらを参照していただきたい。なお、本報告書内で記載する電位は、全て銀-塩化銀(Ag/AgCl)参照電極(0.199 V vs. SHE 25°C)を対象とした値で示した。

## 4 オンサイト分析の開発と現場への適用事例

### 4.1 水銀薄膜電極を用いたPb、Cd、Cu、Znの同時分析

#### 4.1.1 分析条件の最適化(著者論文No.2)

簡易分析には、高感度という条件が求められる。SV法は、高感度な電気化学分析法であるが、作用電極の表面積をより微小にすることでバックグラウンド電流が低減し、これにより更なる高感度化が実現可能となる。著者は、ガラスプレートにμmサイズの金属線(イリジウム線)を埋め込んだ市販の微小電極を購入し、この金属電極表面に水銀薄膜を形成した水銀薄膜微小電極を作用電極として用いた(図11)。水銀薄膜は、-0.35Vで12分間電解して調製した。この薄膜は測定のたびに調製しなおす必要はなく、1回の調製で50回の連続使用が可能であった。著者らは、水銀薄膜電極を用いた鉛(Pb)、カドミウム(Cd)、銅(Cu)、亜鉛(Zn)の同時分析法を開発した。

模擬溶液を用いて作成した代表的なPb、Cd、Cu、Znのボルタモグラムを図12に示す。微小電極を使用したことでバックグラウンド電流が大幅に低減し、従来のSV法に比べSN比が大きく向上した。また、各ピーク電位も十分に離れているため、4元素の同時定量も可能であった。

電解液のpHはバックグラウンド電流に大きく影響を及ぼす。そこで、支持電解質にはpH緩衝作用を有する0.1mol/L酢酸

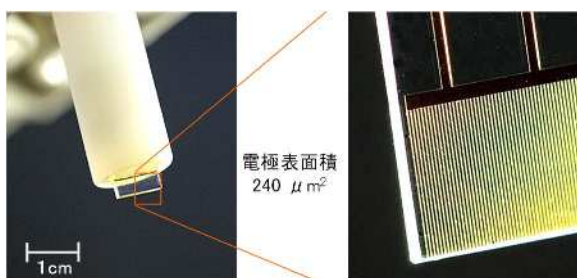


図 11 SV 法に用いた微小電極(出典: 著者論文 No.2)

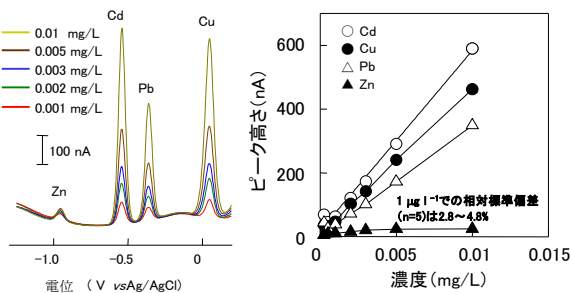


図 12 ボルタモグラムと検量線(出典: 著者論文 No.2)

一酢酸ナトリウム溶液(pH4.2)を使用した。電着電位は-1.3Vとし、攪拌(300rpm)しながら2分間、電極上にPb、Cd、Cu、Znを電着濃縮した。10秒間の静置後、作用電極の電位を50mV/sの速度で0.15Vまで正方向に走査した。

最適条件下で作成した検量線は、0.0002mg/L以上で直線となった(図12)。ただし、Znは直線範囲が短く0.005mg/Lを超えると傾きが低下する傾向にあった。一方、Pb、Cd、Cuは、少なくとも0.01mg/Lまで直線となった。土壤溶出量基準値は、Pbが0.01mg/L、Cdが0.003mg/Lである(表1)。微小電極を用いたSV法は感度が高く、固相抽出などの濃縮作業なしでも基準超過の有無を十分に判別可能であることが実証された。SV法の分析所要時間は、1検体あたり3分以内であった。

定量における共存元素の影響を調べたところ、Al、Ca、K、Cr、Si、Zr、Ti、Fe、V、As、B、Mg、Mnは、Cu、Zn、Pb、Cdの100倍量まで存在してもピーク高さの変動率は5%以下であった。

#### 4. 1. 2 簡易土壌抽出法の開発(著者論文No.3)

土壌汚染調査に適用する簡易分析を開発するには、土壌抽出操作の迅速化も不可欠である。本研究では土壌含有量調査における抽出作業(1mol/L塩酸抽出)を対象に迅速化を検討した。より短時間に土壌中の汚染物質を抽出するには、抽出溶媒の温度や濃度を上げるという方法がある。著者らは、Pbを研究対象に土壌抽出の迅速化について検討した。

含有量試験における希塩酸抽出では、抽出時間とともに抽出濃度は増加し、約2時間で抽出濃度は一定となった(図13左)。希塩酸の濃度や温度を上げる方法は、抽出時間の短縮に有効であり、どちらも15分で公定法(抽出時間:2時間)と同等の抽出濃度が得られた(図13右)。ただし、希塩酸の濃度を上げる方法では、抽出時間が15分を超えると抽出濃度がさら

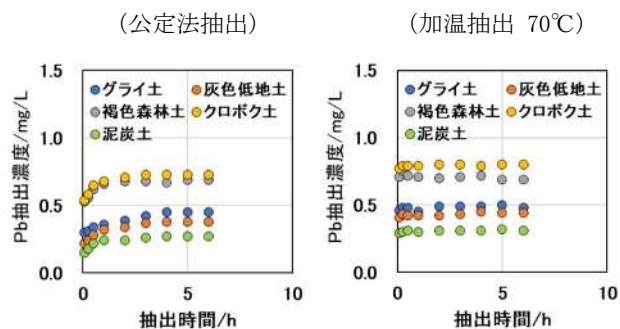


図 13 簡易土壌抽出法の検討(出典: 著者論文 No.3)

に増加したことから、再現性のある抽出濃度を得るには抽出時間を厳密に制御する必要があった。操作の簡便性を考慮して、希塩酸温度を上げる方法(70°C)を採用した。希塩酸の温度を上げることで、抽出時間を2時間から15分に短縮した。

土壌汚染対策法の含有量試験では、土壌試料6gに対して1mol/L塩酸200mLを加えるよう規定されており、抽出操作に用いる容器は溶媒の1.5倍以上の容積を持つことが決められている。したがって、土壌含有量試験に用いる容器サイズは、最低でも500mLとなる。この研究では、抽出操作の簡便性を向上させるため、土壌試料量と抽出溶媒量のダウンサイジング化についても検討した。固液比は一定に維持したまま、土壌試料を1g、抽出溶媒量を33mLに削減した。その結果、従来の方法(土壌6g、抽出溶媒200mL)と分析値や精度に差が生じないことが判明した。

現在、多くの汚染現場で利用されている簡易分析では、固液比を一定に保ったまま、土壌試料量と抽出溶媒量をダウンサイジング化する本法が採用されている。

#### 4. 1. 3 土壌汚染調査への適用(著者論文No.3)

開発した簡易分析技術を射撃場におけるPb汚染土壌調査に適用した。調査は射撃場内の仮設事務所で行い、含有量試験の結果からPb汚染の有無を評価した(図14)。射撃場内北東部の30m四方の区画を調査地に設定し、10m四方の単位区画に9分割した。試料採取は、それぞれの単位区画につき1か所(中心点付近)行った。汚染範囲の詳細な絞り込みを想定し、採取深度は0~5、5~15cmと細かく設定した(一部Pb含有量が高い単位区画は15~30、30~50cm部分も採取した)。水銀薄膜電極によるASV法で土壌分析した結果、Pb汚染は谷部の区画(区画④、⑦)で表層0~5cm部分に蓄積していることが確認できた(表2)。実際に調査地周辺を目視観察した結果、沢が流れる谷部に数多くのPb散弾の存在を確認した。沢の右岸側(西部)は急峻な傾斜になっており、斜面部分を滑落したPb散弾が谷部に集積したものと考えられる。土壌汚染対策法では、表層0~5cm及び下層5~50cmを個別に採取して均等混合するよう定められている(2.1項参照)。一部の単位区画では表層部分のPb汚染が著しく、下層部分と混合しても含有量基準(150mg/kg)を上回る可能性が認められた。この場合、土壌汚染対策法では下層50cmまでが全て汚染土壌と判定されて処理対策の対象となる。SV法による簡易分析を適用することで汚染状況を詳細に把握することが可能となり、処

理土量が大幅に削減できることが本研究により実証できた。

簡易分析と公定法(土壤汚染対策法に基づく土壤調査)の分析結果を比べた結果、差が生じた区画も存在したが、汚染状況は概ね同様の傾向を示すことが判明した(図15)。以上のことから、開発した簡易分析技術は、現場で汚染範囲を絞り込むことが可能なスクリーニング技術として十分に適用可能と考えられる。

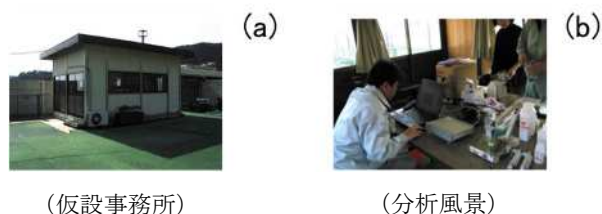


図 14 射撃場でのオンサイト分析風景(出典:著者論文 No.3)

表 2 オンサイト分析結果(出典:著者論文 No.3)

試料採取区画	深度(cm)	Pb含有量(mg/kg)
①	0-5	39
	5-15	15
②	0-5	25
	5-15	8.6
③	0-5	39
	5-15	25
④	0-5	270
	5-15	130
	15-30	20
⑤	0-5	100
	5-15	85
	30-50	20
⑥	0-5	16
	5-15	10
⑦	0-5	460
	5-15	30
	15-30	15
⑧	0-5	7.2
	5-15	55
	30-50	33
⑨	0-5	41
	5-15	82

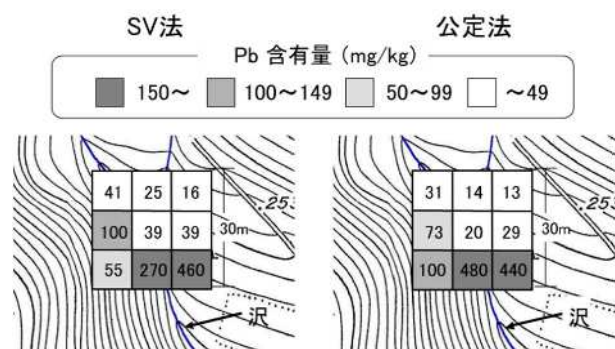


図 15 オンサイト分析と公定法の比較(出典:著者論文 No.3)

## 4.2 無機態Asの化学形態別分析

著者らは、金薄膜電極を用いたASV法による地下水及び河川水中Asのオンサイト化学形態別分析法も開発した。本総合報告では、土壤汚染を対象とした調査・研究事例を紹介しているが、本研究もSV法を適用した簡易分析技術の開発であることから、本報告書内で紹介することにする。

### 4.2.1 実験条件の最適化(著者論文No.4)

Asは毒性の強い元素であるが、その化学形態により毒性は大きく異なる。一般には、有機態As(アルセノベタインなど)に比べて無機態As(As(III)、As(V))の毒性は高く、なかでもAs(III)は非常に強い毒性を有する。そのため、As汚染を評価するには、濃度とともに存在形態が重要になる。

本研究では、金薄膜電極によるSV法を用いた無機態Asの化学形態別分析法を開発した。As(III)は電気化学的に活性であるのに対し、As(V)は電気化学的に不活性という特徴を有している(図16)。本研究では、両元素の電気化学的特性の違いを利用し、無機態Asの化学形態別分析法を開発した。具体的には、はじめにAs(III)のみを定量した後、電解液中のAs(V)をAs(III)に還元して無機態As濃度を測定した。As(V)濃度は、無機態As濃度からAs(III)濃度を引いて算出した。作用電極には安定したバックグラウンド電流が得られた金電極を選択し、感度向上の目的から高いSN比が得られる微小電極を採用した。調製した金薄膜電極は、少なくとも30回の連続測定が可能であった。

電解液には1.2mol/L塩酸を使用し、-0.4Vで5分間、As(III)を金薄膜電極上に電着させた後、0.9Vまで5V/sの速度で電位を正方向に走査した。As(III)の検量線は、0.0005~0.02mg/Lで直線となった。検量線は、ピーク高さあるいはピーク面積どちらで作成しても直線となったが、本分析法では直線範囲がより広いピーク面積を採用した。

As(V)の還元剤にはチオ硫酸ナトリウムが最も適しており、0.5mmol/L添加して溶液を軽く混ぜるだけでほぼ全てのAs(V)がAs(III)に還元した。チオ硫酸ナトリウム共存下で作成したAs(V)の検量線は、0.001~0.02mg/Lで原点を通る直線となった(図17)。また、チオ硫酸ナトリウム共存化で作成したAs(III)の検量線も重なったことから、本条件で全てのAs(V)が還元されたことが実証された。

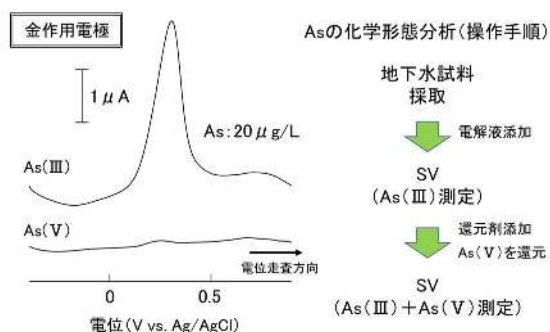


図 16 代表的な As ボルタモグラム(出典:著者論文 No.4)



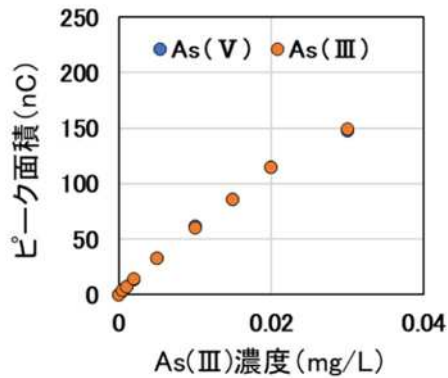


図 17 As 検量線 (出典: 著者論文 No.4)

#### 4. 2. 2 地下水及び河川調査への適用 (著者論文No.4)

県内には、環境基準(0.01mg/L)を上回るAs汚染井戸が多数存在する。また、秩父地域には環境基準値付近のAsを含む河川が存在する。本研究では、開発した分析法を用いてAs濃度とともに存在形態についても解析した。採水した試料を持ち帰ってから分析するとAsの価数が変化する可能性があるため、SV分析装置を車載して現場で分析を実施した(図18)。

分析した結果、地下水中のAsは全てAs(III)であることが判明した(表3)。一方、河川水中のAsは全てAs(V)として存在することが明らかとなった(表3)。地下水の酸化還元電位(ORP)はマイナス値を示していたことから、採水した地下水は強い還元環境にあることが分かった。河川水のORPは150mV以上であり、酸化環境下にあることが確認できた。環境条件の違いがAsの存在形態に影響を及ぼしたものと考えられる。

地下水には高濃度の鉄(Fe)やマンガン(Mn)が含まれていたが、これらの元素はAs定量に妨害を及ぼさなかった。Asを



図 18 車載したオンサイト分析装置(出典: 著者論文 No.8)

表 3 SV による As 化学形態分析(出典: 著者論文 No.4)

試料	As 濃度 (mg/L)			pH	EC (mS/m)	酸化還元電位 (mV)	
	As(III)	As(V)	As(III)+As(V)				
地下水	A	0.038	<0.002	0.033	6.4	39	-120
	B	0.057	<0.002	0.055	6.5	39	-110
	C	0.045	<0.002	0.039	6.5	41	-100
	D	0.019	<0.002	0.019	6.6	47	-140
	E	0.021	<0.002	0.022	6.7	48	-140
	F	0.037	<0.002	0.031	6.8	60	-90
	O	<0.001	0.006	0.006	8.0	38	230
河川水	P	<0.001	0.002	0.002	8.0	13	240
	Q	<0.001	0.01	0.01	7.8	90	250
	R	<0.001	0.007	0.007	7.7	95	150

含む河川水は秩父の鉱山地域に位置しており、高濃度のCuを含んでいた。Cuの共存はバックグラウンド電流を不安定にさせたため、コマ型の陽イオン交換樹脂を通してCuを除去してからSV測定を実施した。

地下水及び河川水試料に粒子状成分が含まれている場合、そのままSV測定を行うとAsの電着効率が大幅に低減する。このような場合は、SV測定に先立ち、ディスク型のメンブレンフィルターなどで地下水や河川水をろ過する必要がある。

Asは有機物や土壌粒子を主体とする粒子状成分にはあまり吸着しないが、Fe及びMn酸化物には非常に強く吸着する。これらの金属酸化物に由来する粒子状成分を含む場合には、SV測定に先立ち酸処理する必要があるが、本分析方法では電解液として1.2mol/L塩酸を使用しているため、塩酸添加後、しばらく放置することで金属酸化物に由来する粒子状成分は溶解する。

#### 4. 2. 3 土壌汚染調査への適用 (著者論文No.5)

金薄膜電極を用いたASV法を土壌汚染調査に適用する際の検討を行った。溶出量試験(水溶出)では、4.2.1項の条件をそのまま採用することができたが、含有量試験(希塩酸抽出)では土壌から高濃度のCuが抽出されたためAsの定量が困難であった。そこで、コマ型の固相抽出材として陽イオン交換樹脂、キレート樹脂、Cuに対して特異的に反応する分子認識ゲルを用いて、Cuの除去効果を検討した。

陽イオン交換樹脂は、選択性が低く、土壌から抽出された様々な陽イオンを吸着するため、Cuの除去効率が著しく低い結果となった。キレート樹脂は、pH3以上でCuを99%除去できたが、1mol/L塩酸抽出液をpH3以上に調整するには高アルカリ溶液の添加が必須となる。分子認識ゲルは、pHの影響はほとんど受けずに1mol/L塩酸抽出液中から90%以上のCuを除去することが可能であった(表4)。操作過程に分子認識ゲルを用いた前分離を導入することで、SVによるAs簡易分析法は土壌汚染調査にも十分適用できることが明らかとなった。

本論文でも土壌抽出操作の迅速化及び抽出操作のダウンサイジング化について検討しており、溶出量試験では振とう時間を15分に短縮しても公定法(振とう時間6時間)と同等のAsが溶出されること、含有量試験では4.1.2項で検討したように抽出溶媒を加熱することで抽出時間を5分に短縮できることを確認している。土壌試料量と抽出溶媒量は、溶出量試験で1gと10mL、含有量試験で1gと33mLを採用している。

表 4 固相抽出による Cu 除去率(出典: 著者論文 No.5)

抽出溶媒	固相抽出材	Cu除去率 (%)			As回収率 (%)		
		土壌試料1	土壌試料2	土壌試料3	土壌試料1	土壌試料2	土壌試料3
1mol/L 塩酸	MG-1	0	47	0	102	102	105
	ME-1	1	1	10	99	99	98
	TE-3	94	98	96	98	92	97
希塩酸 pH 3	MG-1	0	0	0	110	90	87
	ME-1	99	99	99	11	54	26
	TE-3	95	96	97	105	97	90
希塩酸 pH 5	MG-1	84	0	3	90	76	102
	ME-1	100	100	100	100	104	94
	TE-3	97	96	97	100	99	104

MG-1: 陽イオン交換樹脂 ME-1: キレート樹脂 TE-3: 分子認識ゲル



## 5 行政施策への貢献

### 5.1 県内射撃場における環境保全対策工事

本項では、県内射撃場における土壌汚染対策を目的とした環境保全対策工事(平成18～21年度 4年間)にオンサイト分析を活用した事例を紹介する。本対策工事では、環境科学国際センターに対して技術的な補助や助言が求められたため、汚染調査に関する知見や情報を提供するとともに、水銀薄膜電極を用いたASV法によりPb汚染の範囲を把握することを提案した。これを受けて、環境保全対策工事では簡易分析を適用してPb汚染状況の把握と汚染範囲の絞り込みを行うこととなった。調査手法としては、当センターが射撃場内の一部の区画において公定法による予備調査を実施した後、全敷地の土壌汚染調査を簡易分析で実施する流れとなった。ただし、射撃場は非常に広大で、全ての敷地を当センターが調査することは困難であったことから、民間の分析調査会社に開発した簡易分析を技術移転して汚染調査を行うことにした。

#### 5.1.1 センターによる予備調査結果(著者論文No.6)

平成17年度に射撃場内の全64区画(1区画 30m四方)のうち一部の区画(6区画)で土壌汚染調査を行った(図19(a))。各区画では、中心点①、上部②、右部③、下部④、左部⑤の5か所で土壌採取した(図19(b))。採取深度は、以前行った簡易分析調査(4.1.3項参照)を参考に、0～5、5～15cmとした。

土壌溶出量試験及び土壌含有量試験の分析結果を表5に示す。溶出量試験では、一部の区画を除き、全ての試料で溶出量基準(0.01mg/L)を超過した。溶出量は含有量と同様に深度方向で減少する傾向を示したが、5～15cmでも0.01mg/L以下まで溶出量が低下した地点はほとんどなかった。Pb含有

量が10mg/kg前後のバックグラウンド土壌でも溶出量は0.01mg/Lを超える傾向にあり、溶出量試験の分析結果はPb散弾に起因する汚染の有無を必ずしも反映していなかった。溶出量基準を超えた試料の土壌溶出液を目視観察したところ、全て茶褐色に懸濁していた(図20)。この懸濁物質は土壌の微粒子であり、この微粒子は3000Gの遠心分離では沈降せず、0.45 $\mu$ mメンブレンフィルターでも捕捉されなかったため、溶出量基準を上回るPbが検出されたことが明らかとなった。溶出量

表5 公定法によるPb分析結果(出典:著者論文No.6)

区画No.	試料採取地点	深度(cm)	土壌溶出液		溶出濃度(mg/L)	含有量(mg/kg)
			pH	EC(mS/m)		
7	①	0-5	7.4	5.5	0.130	80
		5-15	7.3	2.3	0.120	28
	②	0-5	7.5	3.4	0.540	240
		5-15	7.3	1.7	0.090	26
	③	0-5	8.2	8.9	0.069	170
		5-15	8.4	7.6	0.190	190
	④	0-5	7.9	1.3	0.290	340
		5-15	7.5	2.7	0.150	100
	⑤	0-5	7.6	4.3	0.120	38
		5-15	7.4	2.0	0.091	11
10	①	0-5	6.7	1.5	0.440	280
		5-15	6.3	1.1	0.053	18
	②	0-5	6.4	1.6	0.470	230
		5-15	6.4	1.3	0.160	51
	③	0-5	6.3	2.0	0.096	79
		5-15	6.4	1.9	0.120	92
	④	0-5	7.2	2.4	0.460	190
		5-15	6.4	1.3	0.140	62
	⑤	0-5	6.2	1.1	0.290	180
		5-15	6.3	1.3	0.180	79
29	①	0-5	6.1	1.9	0.120	64
		5-15	6.0	1.8	0.085	32
	②	0-5	6.1	1.4	0.044	23
		5-15	6.1	1.4	0.025	5.9
	③	0-5	6.0	1.8	0.064	120
		5-15	6.2	2.6	0.270	70
	④	0-5	6.1	1.8	0.076	53
		5-15	6.1	1.5	0.030	12
	⑤	0-5	6.1	1.7	0.078	43
		5-15	6.1	2.0	0.027	17
37	①	0-5	5.7	1.3	0.540	190
		5-15	5.6	1.4	1.300	210
	②	0-5	5.8	2.0	0.150	1200
		5-15	6.0	1.0	0.240	48
	③	0-5	5.9	1.9	1.100	430
		5-15	5.9	1.6	0.050	70
	④	0-5	6.2	2.1	2.100	1600
		5-15	6.1	2.0	2.000	870
	⑤	0-5	6.2	1.9	0.110	32
		5-15	6.2	1.9	0.068	19
47	①	0-5	6.7	4.3	0.005	900
		5-15	6.0	3.0	0.001	54
	②	0-5	5.8	4.1	0.001	60
		5-15	5.8	1.8	0.001	6.3
	③	0-5	5.8	2.3	0.002	18
		5-15	5.6	2.2	0.001	7.5
	④	0-5	5.7	2.5	0.029	84
		5-15	5.6	3.2	0.007	83
	⑤	0-5	6.1	5.2	0.001	260
		5-15	6.2	4.5	0.001	150
59	①	0-5	7.0	2.2	1.400	860
		5-15	6.7	1.7	0.190	93
	②	0-5	7.1	1.7	0.550	61
		5-15	7.1	2.0	0.380	74
	③	0-5	7.2	2.0	0.560	110
		5-15	6.9	2.4	0.330	71
	④	0-5	6.8	1.9	1.100	920
		5-15	6.4	1.6	1.200	510
	⑤	0-5	6.3	1.2	0.600	560
		5-15	6.2	1.2	1.200	910
バックグラウンド	A		6.2	6.7	0.011	16
	B	0-10	6.4	8.7	0.022	13
	C		6.1	3.6	0.017	7.5
	D		4.9	11	0.003	25

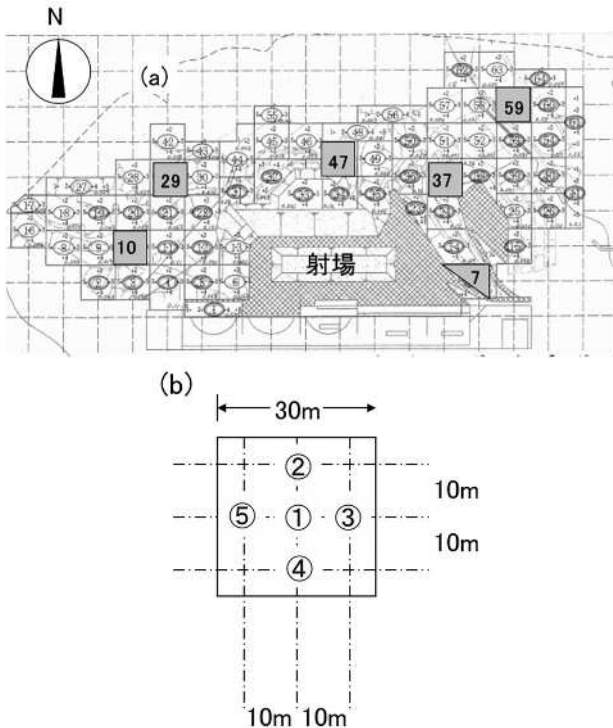


図19 射撃場での試料採取地点(出典:著者論文No.6)

に対する土壌微粒子の影響を明確にするため、分子量サイズ10,000及び1,000の限外ろ過膜を用いて水溶出液を分画し、各溶液中のPb濃度を測定した。Pbは、分子量分画10,000以上の領域に局在し、遊離イオンとしては存在していないことを確認した(図21)。土壌カラム試験を実施した結果、微粒子は土壌中を浸透しにくく、地下水汚染を引き起こす可能性は非常に低いことが明らかとなった。本予備調査の結果を踏まえ、土壌汚染調査では土壌含有量試験の結果を基に汚染の有無及び汚染範囲を評価することとなった。

土壌溶出量に対する土壌微粒子の影響は、この数年間に数多くの研究者らにより検討されはじめている。著者らが土壌微粒子の影響を明らかにしたのは15年以上も前のことであり、今では土壌溶出量試験方法の改正などにも波及している。

### 5. 1. 2 簡易迅速分析法に関する技術交流会の開催

平成19年3月、当センターが開発したSV法による簡易分析技術の普及と技術移転を目的とした技術交流会を開催した。本交流会には埼玉県環境計量協議会の会員企業が多数参加し(参加企業17社、参加人数26名)、著者による講演(題名:SV法の基礎と土壌分析への適用)のほか、オンサイト型SV装置を製造・販売している分析機器メーカーによる簡易分析の実演(北斗電工(株)、ジーエルサイエンス(株))や簡易土壌採取方法の研修も実施した。

簡易分析の実演は、実際に射撃場敷地内で採取した土壌試料を用いて行い、水溶出や希塩酸抽出操作などの前処理からSV法による定量操作まで紹介した。射撃場内には沢が流れており、その付近は谷部になっていることから多くのPb散弾が存在していた。本技術交流会では、沢水も採水して簡易分析法でPb濃度を測定した。土壌採取では、ステンレス製の



図 20 土壌溶出液の様子(出典:著者論文 No.6)

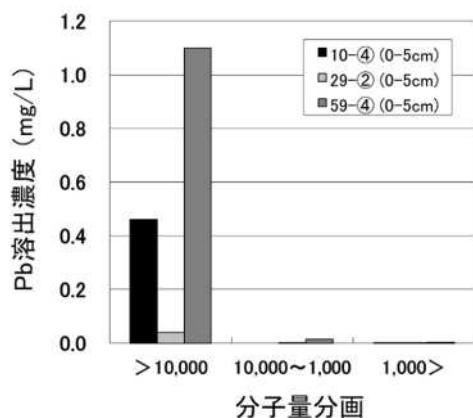


図 21 土壌溶出液中の Pb 濃度(出典:著者論文 No.6)

四角柱形枠組み(W 20cm×D 20cm×H 15cm)を土壌表面に木製ハンマーで打込む簡単な方法を紹介した。本交流会の参加者は2組に分かれ、土壌採取と簡易分析に関する研修を交互に体験した。

本技術交流会の詳細な内容及び研修の様子については、日本環境測定分析協会が発行している『環境と測定技術』で報告されている<sup>20)</sup>。

### 5. 1. 3 簡易分析を適用した射撃場Pb汚染土壌調査

環境保全対策工事は、平成18から21年度までの4年間実施された。本工事は前半(平成18~19年度)と後半(平成20~21年度)に分割され、前半は応用地質(株)、後半は(株)環境総合研究所が土壌汚染調査を担当した(環境総合研究所は技術交流会に参加)。本対策工事では、水銀薄膜電極を用いたASV法によりPb汚染土壌の存在範囲を明確にしたうえで、汚染土壌を掘削除去する手法を採用した。土壌汚染調査は、当センターが開発したSV法で実施し、事前の調査結果(5.1.1項)で溶出量は汚染の有無を反映していないことが判明したため、含有量試験の結果から汚染範囲を評価した。当センターは、分析受託業者が提出した土壌分析結果の妥当性を評価する目的から、一部の区画において簡易分析を用いた土壌調査を実施し、クロスチェックによる精度管理を行った。

当センターによる予備調査の結果(5.1.1項)、射撃場内のPb汚染は主に表層土壌に蓄積していることが判明している。そこで本対策工事では、簡易分析を用いた土壌調査で深度方向における汚染状況を詳細に把握し、処理土量の削減を試みることにした。平成18年度から平成19年度上半期までの調査結果を表6(a)に示す。全調査区画75のうち31区画(41%)では、掘削深度5cmでPb汚染が十分に除去できたことが分かった。また、掘削深度10cmの区画と合わせると、調査区画の70%は表層土壌のみ汚染されていることが明らかとなった。これらの区画のほとんどでは、表層土壌(0~5cm)におけるPb含有量が300mg/kgを超えていたことから、公定法による調査(0~5cm、5~50cm等量混合)では深度50cmまでが汚染土壌と判定され、掘削深度は50cmとなる。簡易分析で汚染土壌の存在範囲を絞り込んだ結果、90%以上の区画で掘削深度が40cm以下に削減できることが明らかとなった。一部の区画では1m以上の掘削を要したが、これらの区画では土木工事に伴う重機の侵入が認められたことから、土壌が深くまでかく乱されている可能性が考えられた。これらの区画では、深度1m付近の土壌からもPb散弾の存在が確認された。平成19年度下半期から平成21年度上半期までの調査結果を表6(b)に示す。表6(a)と同様、Pb汚染の多くは表層に留まっており、60%以上の区画では掘削深度15cmでPb汚染を十分に除去できることが判明した。平成21年度下半期の調査結果を表6(c)に示す。本調査結果も今までと同様の傾向を示し、90%近くの区画において15cmの掘削で汚染は十分に除去できることが分かった。

本対策工事で採用した掘削除去法は、国内でもっとも利用されている対策手法であるが、膨大な処理コスト(搬出土壌1tあたり35,000~40,000円)を要するという問題がある。本調査

表6 射撃場での汚染土壌掘削結果

掘削深	5cm	10cm	15cm	20cm	30cm	40cm	50cm	65cm	75cm	85cm	1.3m	1.5m	合計
区画数	31	20	2	8	6	2	1	1	1	1	1	1	75
割合%	41.3	26.7	2.7	10.7	8	2.7	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	100

掘削深	5cm	15cm	25cm	35cm	45cm	55cm	65cm	合計
区画数	21	23	10	3	2	1	9	69
割合%	30.4	33.3	14.5	4.3	2.9	1.4	13	100

掘削深	5cm	15cm	25cm	35cm	45cm	55cm	65cm	75cm	合計
区画数	37	63	9	2	1	0	0	0	112
割合%	33	56.3	8	1.8	0.9	0	0	0	100

では256単位区画(10m四方)が設置され、そのうちの約85%に相当する221区画で表層土壌(0~5cm)におけるPb含有量が300mg/kgを超えた。この221区画を公定法で調査した場合、50cmまでの土壌全てが汚染土壌と評価される可能性が高い。仮に、この221区画で50cmまで掘削を行うと、搬出土壌は21,100tと算出(10m×10m×0.5m×221=11,050m<sup>3</sup> 土壌粒子の比重を2g/cm<sup>3</sup>として重さを求めると 11,050×2=22,100t)される。実際に4年間の工事で搬出された汚染土壌は7,624tであったことから、簡易分析による汚染土壌の絞り込みにより、搬出土壌は約65%削減されたことになる。汚染土壌の処理コストを35,000円/tとして算出すると、簡易分析を適用したことで約500,000,000円の処理コストが削減できたことになる。

以上の調査結果からも明らかのように、簡易分析の導入は、汚染対策の低コスト化に大いに寄与することが実証できた。

## 5.2 廃棄物処分場周辺の土壌汚染調査(著者論文No.6)

平成17年、埼玉県内の廃棄物処分場周辺でPb汚染土壌調査を実施した。10m四方の6区画(S1-S3、S9-11)、15m四方の3区画(S4-6)、10m×15mの2区画(S7、8)を設定し、各区画の中心点から土壌試料を採取した(図22)。また、土壌電気伝導率から汚染が懸念された2地点(S5+6、S6-2)も調査した(一般的に塩類を多量に含む煤塵などで土壌が汚染された場合、土壌のECは高くなる傾向にある)。採取方法は土壌汚染対策法に基づき、表層0~5cmと下層5~50cmに分割した。公定法調査では表層と下層を等量混合し、水銀薄膜電極を用いたASV法では表層と下層をそれぞれ分析した。公定法では含有量試験と溶出量試験、SV法では含有量試験を実施した。

公定法による調査の結果、周辺の敷地には含有量基準(Pb 150mg/kg)を上回る汚染が複数の区画で確認された(表7)。この汚染は、射撃場でのPb汚染調査と同様に表層0~5cmで留まっていることが簡易分析の結果から明らかとなった(表8)。調査地域を管轄する環境管理事務所は、周辺住民に対する影響を考慮して、土壌汚染対策を実施することにした。SV法による簡易分析の結果から、本汚染対策では表層土のみを掘削除去する方法を採用し、処理対策に要する手間、時間及びコストを大幅に削減した。

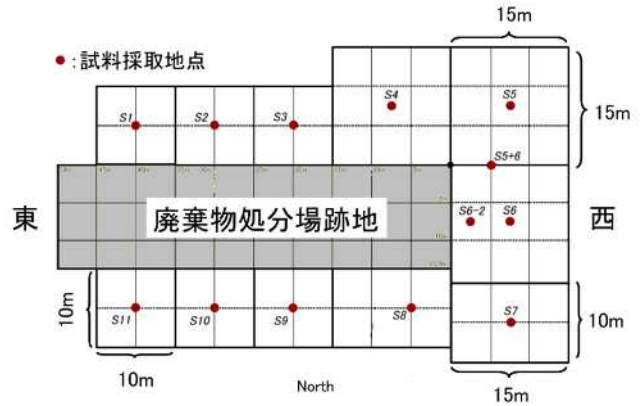


図22 廃棄物処分場周辺での試料採取地点

(出典:著者論文 No.6)

表7 公定法によるPb分析結果(出典:著者論文 No.6)

試料採取地点	深度(cm)	土壌溶出液		溶出濃度(mg/L)	含有量(mg/kg)
		pH	EC(mS/m)		
S1	0-50	6.4	11	0.0005	73
S2	0-50	6.5	12	0.0006	230
S3	0-50	6.6	14	0.0005	480
S4	0-50	6.4	13	0.0005	150
S5	0-50	6.8	11	0.0006	190
S6	0-50	6.5	7.0	0.0005	63
S7	0-50	6.3	6.0	0.0008	88
S8	0-50	6.5	12	0.0008	150
S9	0-50	6.4	9.0	0.0008	540
S10	0-50	6.7	4.0	0.0005	19
S11	0-50	6.3	15	0.0007	200
S5+6	0-50	6.4	10	0.0008	86
S6-2	0-50	6.7	15	0.003	260

表8 簡易分析によるPb分析結果(出典:著者論文 No.6)

試料採取地点	深度(cm)	含有量(mg/kg)	試料採取地点	深度(cm)	含有量(mg/kg)
S1	0-5	99	S8	0-5	220
	5-50	45		5-50	110
S2	0-5	430	S9	0-5	560
	5-50	30		5-50	460
S3	0-5	1100	S10	0-5	24
	5-50	22		5-50	18
S4	0-5	340	S11	0-5	340
	5-50	26		5-50	80
S5	0-5	340	S5+6	0-5	110
	5-50	40		5-50	60
S6	0-5	86	S6-2	0-5	370
	5-50	28		5-50	110
S7	0-5	120			
	5-50	36			

本汚染調査では、含有量基準を超えている区画(S3、S9)においても、Pb溶出量は基準(Pb 0.01mg/L)を大きく下回った。この結果は、バックグラウンドレベルのPb含有量でも溶出量が基準を超えた射撃場での汚染調査結果と大きく異なっていた。土壌溶出液は全て無色透明であったことから、本調査では土壌微粒子由来のPbが検出されなかったものと考えられる。射撃場内の土壌は褐色森林土であったのに対し、廃棄物処理場周辺は火山灰土壌が分布していた。火山灰土壌には、Fe、Mnの酸化物が高濃度で含まれており、これらの酸化物は中性付近で正に帯電している。一方、土壌粒子は中性付近で負に帯電している場合が多く、FeやMnの酸化物の存在で土壌微



粒子の凝集が促進されたものと考えられる。褐色森林土には火山灰土壌ほど金属酸化物が含まれていないため、土壌微粒子同士の分散が促進された可能性が高い。

県内2地点における土壌調査結果を比較解析することで、Pb溶出量に影響を及ぼす因子を特定することができた。近年、全国各地で自然由来の土壌汚染事例が報告されているが、そのなかには土壌微粒子由来の汚染も数多く含まれている。的確な汚染対策を実施するためにも、土壌微粒子の分散性に影響を及ぼす化学的な知見や情報は非常に重要である。

### 5.3 水質監視事業の効率化(著者論文No.7)

埼玉県にはAsによる地下水汚染が数多く存在し、県中西部、南東部、北東部を中心に約30地点の継続監視井戸が設置されている(図23)。環境省の“地下水質モニタリングの手引き<sup>21)</sup>”には、汚染原因が自然由来であり、かつ飲用指導が徹底されている場合は、業務効率化の観点から、調査頻度の低減や調査の中止ができること記述されている。県も環境省の考えに基づき、As継続監視調査の中止を検討することになった。調査を中止するには、汚染原因が自然由来であることを科学的データに基づいて立証する必要がある。As汚染が自然由来である場合、地下水中のAsはAs(III)として存在するが、As(III)は大気中で容易に空気酸化されるため、地下水を研究所に持ち帰った後ではその化学形態が変化することが考えられる。したがって、地下水中のAsがAs(III)として存在することを証明するにはオンサイト分析技術の導入が不可欠となる。そこで、当センターが開発した金薄膜電極を用いたASV法により、地下水As汚染の原因を究明した。

4.2.2項でも紹介したように、簡易分析を使用して地下水を分析した結果、AsはAs(III)として存在することを確認し、この結果を水環境課に報告した。著者らは、地下水質だけでなく、県中西部の2か所で掘削した地質試料も分析し、地下水へのAs溶出メカニズムを解析した。自然由来のAs汚染は、Fe酸化物の表面に付着しているAsが還元環境に晒され、Feとともに溶出することで発生する。したがって、As溶出メカニズムを明確にするには、多種多様なAs化合物のなかからFe酸化物表面に吸着したAsを選択的に抽出しなければならない。著者は、Fe酸化物分別溶解法を適用し、Fe酸化物に吸着したAsのみを抽出する方法を検討した。Fe酸化物分別溶解法としては、



図23 As継続監視井戸の分布状況

すでにいくつかの方法(改良BCR法:塩化ヒドロキシルアンモニウム抽出法、Tamm法:シュウ酸—シュウ酸ナトリウム抽出法、DC法:ジチオナイト—クエン酸ナトリウム抽出法)が提唱されているが、それらの溶解法を比較検討した結果、DC法が最適であり、抽出されたAs濃度とFe濃度の相関性が最も高いことを見出した(図24)。DC法で抽出したFe濃度とAs濃度の比率は、地下水中のFeとAsの濃度比率と概ね一致したことから、当該地域ではFe酸化物の表面に吸着したAsが還元環境下で地下水に溶出したことが明らかとなった。県中西部のボーリング柱状図を入手したところ、本地域一帯には有機物含量の高い泥炭土が堆積していることが確認された。泥炭土の存在は、好気性微生物の活性化に伴う地下環境の還元化を促進する。県中西部では、上述の溶出メカニズムで自然由来のAs汚染が発生していることが分かった。

水環境課は、当センターの研究成果を受けて令和4年度に“埼玉県地下水常時監視実施方針”を一部改正し、“自然由来の場合、継続監視調査を終了及び行わないとすることができる。”というように文章を修正した。これにより、令和5年度以降、30件の自然由来のAs継続監視調査が終了となり、水質監視事業の効率化を実現することができた。

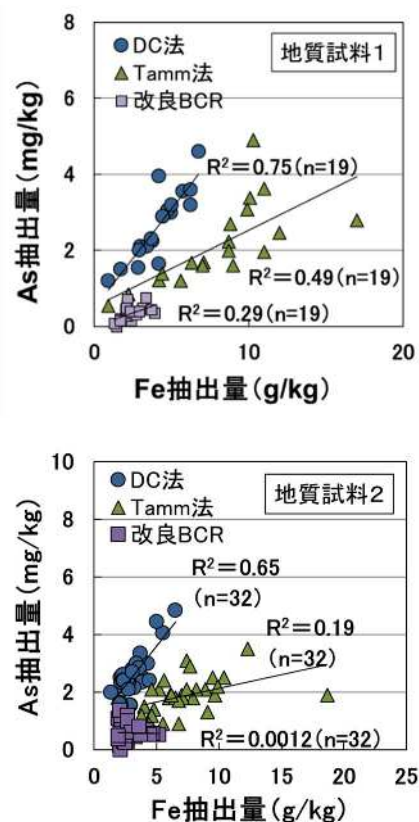


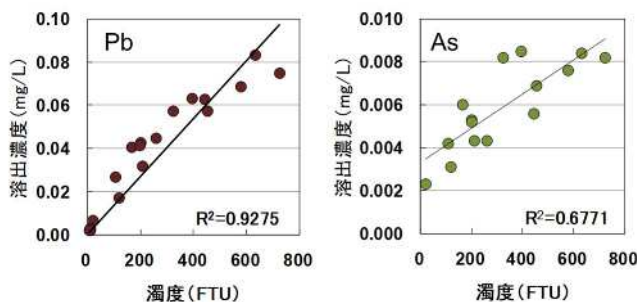
図24 As抽出濃度とFe抽出濃度の相関性  
(出典:著者論文No.7)

### 5.4 県内圏央道建設予定地で発生した土壌汚染

平成24年、埼玉県内の首都圏中央連絡自動車道(圏央道)の建設予定地でPb、Asによる土壌汚染が発生した。建設工事を所管する国土交通省関東地方整備局の大宮国道事務所は、

建設発生土処理対策検討会議を設置し、汚染原因の究明とともに処理対策法について検討することになった。検討会議には、国公立大学や国立研究機関に所属する学識経験者のほか、埼玉県からは土壤汚染が発生した桶川市と北本市の副市長、県中央環境管理事務所長と著者が検討委員として参加した。第1回の検討会議で提示された土壤調査結果から、本汚染事例は自然由来であり、そのメカニズムは土壤微粒子の発生に伴う溶出基準超過であることを著者は発言した。土壤調査では、PbやAsの含有量はバックグラウンドレベルであったにも関わらず、溶出量のみが基準を超過していた。しかも、基準を超過した項目はPb及びAsなど自然土壤中に一定量含まれている元素に限られていた。以上の理由から著者は、本汚染原因を自然由来と判断した。著者の発言を含む様々な内容について議論が行われた結果、本検討会議では汚染原因を自然由来と断定した。本汚染の発生時、自然由来の汚染土壤も法律の適用範囲であったため、汚染土壤(自然由来)と未汚染土壤を効率よく識別する手法についても議論が行われた。汚染原因が土壤微粒子の生成に起因しているならば、土壤溶出液の濁度とPbやAsの溶出濃度は相関性が高いと考えられることから、著者は現場で土壤試料の簡易水溶出を行い、土壤溶出液の濁度をその場で測定して基準超過のおそれがあるかどうかを判別する方法を提案した。後日、土壤調査を担当した環境コンサルティング業者から土壤溶出液の濁度とPb、Asの溶出濃度との間に良好な相関関係が認められたとの報告を受けた(図25)。なお、本調査でも土壤試料量と抽出溶媒量のダウンサイジング化とSV法を組み合わせた手法を簡易分析技術として用いたとの報告を調査担当者から受けた。

著者らの研究成果や土壤汚染に関する知見や情報を活用することで、圏央道埼玉県区間の建設工事は順調に進み、当初の予定どおり、平成27年度に開通式を迎えることができた。



土壤溶出液の濁度とPb, Asの溶出濃度は比例

土壤溶出液の濁度から  
Pb, As溶出濃度が評価可能

図 25 土壤溶出液の濁度とPb, As 溶出濃度の関係

### 5.5 小児医療センター建設予定地で発生した土壤汚染

平成25年、埼玉県立小児医療センターの移転に伴う土壤調査でAsによる溶出量基準超過が発生した。当初、汚染源は不明とされ、人為由来、自然由来の両面から原因究明が実施

された。当センターにも移転工事を担当した部局から汚染原因に関する助言が求められた。

土壤調査の結果を詳細に確認したところ、As溶出は深度5.6~6.2mの地層に集中していることが判明した。ボーリング柱状図を確認した結果、この深度には腐植土が堆積しており、As溶出は腐植土層が原因であることが明らかとなった。Asは、植物中に吸収されやすく、枯死した植物が土壤化した腐植土からは基準を上回る濃度で溶出する場合がある。移転工事を担当した部局にそのことを情報提供し、この汚染事例は自然由来の可能性が高いことを報告した。当センターからの助言も踏まえ、担当部局は平成26年4月に本土壌汚染調査の結果について記者発表を実施することになった。記者発表では、著者も同席することになった。事前に汚染原因を自然由来と特定できたことで、記者会見では大きな混乱は生じず、その後の工事に影響がでることはなかった。

小児医療センター建設予定地の一部は、大宮台地南部の谷底平野に位置している(図26)。谷底平野は湿地帯を形成しやすく、枯死した植物が土壤化した腐植土が数mの厚さで堆積している場合が多い。谷底平野に小児医療センターを建設したため、自然由来のAs汚染が発生したものと考えられる。As溶出の原因となった腐植土は黒色の地質であり、他の地層と容易に判別することができる。対策工事では、黒色の腐植土を分別保管し、腐植土のみを処理対策にまわすよう助言した。また、掘削深度も黒色の腐植土の存在が確認できなくなるまでとした。As溶出メカニズムを解明して汚染原因が自然由来であることを明確にするとともに、その原因となった地層を特定したことにより、処理対策コストの大幅な削減が可能となった。また、建設工事が停滞することなく、移転工事を予定どおり円滑に実施することができた。

本事例では、Asを対象とした土壤簡易分析の開発を進める過程で獲得した学術的知見や情報を活用することで、汚染原因の究明や対策方法の提案など行政施策に大いに貢献することができた。



図 26 小児医療センター建設予定地の位置図

## 6 社会実装化への展開

### 6.1 民間企業との共同研究開発

簡易分析に関する研究では、開発した方法の社会実装化

を目指す目的から、民間企業（ジーエルサイエンス(株)）と共同研究を実施することにした。共同研究は、平成15年度から平成23年度までの9年間継続して行った。ジーエルサイエンス(株)は、埼玉県内に工場を所有し、オンサイト型のSV装置を取り扱っていることから、共同研究相手として選択した。

共同研究期間内に4つの研究課題を設定し、平成15年度から平成17年度は“電気化学的手法による土壌中重金属の簡易迅速分析法開発”、平成18年度から平成20年度は“電気化学的手法による土壌・地下水Asの簡易迅速計測法開発”、平成21、22年度は“海成堆積物からの重金属溶出特性解析”、平成23年度は“分子認識ゲルを用いた分離濃縮技術の開発と簡易分析への適用”に関する研究を行った。

共同研究の成果は、学術論文として投稿（3件：著者論文No.3、4、6）したほか、数多くの学会や環境科学国際センター講演会、環境科学国際センターニュースレターなどを利用して積極的に発表した。研究予算は双方が個々に負担し、当センターでは、自主研究予算とともに、競争的研究の予算（鉄鋼財団研究助成：平成18～19年度 3,000千円 代表：石山高、科研費基盤(C)：平成17～20年度 3,200千円 代表：石山高）も活用した。

開発した簡易分析技術や関連する学術的な知見や情報は、県内で発生した様々な土壌汚染事例に活用してきた。更に、著者らの共同研究グループは、開発技術の全国レベルでの普及を目指すため、東京都が平成17年度から平成21年度に公募した“土壌汚染調査（揮発性有機化合物及び重金属類）の簡易で迅速な分析技術”に応募することにした。

## 6.2 東京都が公募した土壌簡易分析への申請

東京都では、毎年多くの土壌汚染事例が報告されている<sup>1)</sup>。都は土地所有者等の経済的コスト負担を軽減する目的から、汚染範囲を絞り込むための簡易分析の利用を積極的に推奨してきたが、簡易分析は公定法と認定されていないことから、汚染の有無は最終的に公定法で調べる必要があった。都は、公定法と同等の精度、感度を有する簡易分析技術を公募し、採択された分析技術は都条例（都民の健康と安全を確保する環境に関する条例）に基づく土壌汚染調査に利用可能な分析技術として認定することにした。東京都環境科学研究所が調製した土壌試料を申請機関に配付し、得られた分析結果や提案された分析方法などを総合的に評価して採択技術の決定が行われた。平成17年度は重金属、平成18年度は揮発性有機化合物の分析技術を公募し、平成19、21年度は重金属と揮発性有機化合物の両分析技術を再度公募した。

本公募では、分析技術の精度や感度だけでなく、オンサイト分析として適用可能か、受託分析が可能かなど様々な項目が評価対象となった。本公募は、民間の分析調査会社（計量証明事業所や地質・環境コンサルタントなど）に簡易分析技術を普及させ、多くの土壌汚染調査事例に簡易分析を活用することを目的としているため、申請者は受託分析が可能な民間調査会社に限られていた。そこで著者らの共同研究グループでは、ジーエルサイエンス(株)が代表して簡易分析を申請した。

審査の結果、開発した技術は簡易分析として採択された。

本公募で採用された簡易分析技術は4つに大別でき、VOCを対象とした簡易分析技術としてはポータブル型ガスクロマトグラフィー、重金属類の土壌含有量分析にはエネルギー分散型の蛍光X線分析、重金属類の溶出量分析にはSVと吸光光度分析が選定された<sup>22, 23)</sup>。

## 6.3 実用化されている簡易分析技術（著者論文No.8）

土壌汚染調査に適用可能な簡易分析技術としては、装置が小型で現場に持ち込めること、定量感度が高く、土壌環境基準(表1)を上回るかどうかを容易に判定できることが求められる。これらの条件を満たすものとして、表9に提示した分析技術が現在利用されている。VOCの簡易分析技術としては、ポータブル型のガスクロマトグラフィーが一般に利用されている。一方、重金属類では複数の分析が実用化されており、土壌含有量調査では蛍光X線分析法、土壌溶出量調査ではSV法と吸光光度法が適用されている。電気的に活性なPb、Cd、As、セレン(Se)の分析にはSV法、不活性なF、ほう素(B)、Cr(VI)、CNの分析には吸光光度法が利用されている。

蛍光X線分析法は代表的な固体分析技術であり、汚染土壌を前処理せずにそのまま重金属類の含有量を分析することができる。土壌含有量調査では、汚染土壌に含まれる有害重金属類の含有量に対して基準が設定されていることから(表1)、簡易分析には蛍光X線分析法が使用されることが多い。一方、SV法や吸光光度法は液体試料を対象とした分析技術であるため、土壌溶出量調査において頻繁に利用されている。SV法では、作用電極として水銀電極の他、銅やカーボン電極などが使用されており、銅やカーボン電極を用いれば水銀(Hg)も分析可能となる。土壌溶出液中の重金属類をフィルター上に吸着させることにより、蛍光X線分析法でも土壌溶出量分析が可能となるが、この方法はSV法よりも感度的に劣っている。

以上のように、SV法は土壌汚染調査の簡易分析技術（オンサイト分析技術）として社会実装化を達成しており、現在では全国各地の汚染現場で汚染範囲を絞り込むための調査手法として、あるいは公定法の代替分析技術として活躍している。

表9 実用化されている土壌簡易分析(出典：著者論文 No.8)

分析技術名	試験方法		測定可能元素
	土壌溶出量試験	土壌含有量試験	
エネルギー分散型 蛍光X線分析法			Pb, Cd, As Se, Hg
ストリッピング ボルタンメトリー	○ 適用可能	○ 適用可能	Pb, Cd, As Se, Hg
吸光光度法			Cr <sup>6+</sup> , F, B, CN
ポータブル型 ガスクロマトグラフィー	○ 適用可能	—	VOC

## 7 発表論文と獲得した競争的研究費

本総合報告では、著者らの研究成果を発表した学術論文を多数引用している。引用した論文のリスト及び研究を進める



うえで活用した競争的研究費を以下に示す。

### 7.1 著者論文リスト

- 1) 石山高(2007)土壤中重金属類の簡易迅速分析法に関する技術交流会 -ストリッピングボルタンメトリーの基礎と土壤分析への適用-、環境と測定技術、Vol.34、No.9、pp. 110-118.
- 2) 石山高、高橋基之、鈴木幸治、古庄義明(2004)水銀膜微小電極を用いたストリッピングボルタンメトリーによる土壤中亜鉛、カドミウム、銅及び鉛の簡易迅速定量、水環境学会誌、Vol. 27、No.11、pp. 715-720.
- 3) 石山高、高橋基之、鈴木幸治、古庄義明(2006)ストリッピングボルタンメトリーを適用した鉛汚染土壤のオンサイト評価手法の開発、水環境学会誌、Vol. 29、No.2、pp. 115-120.
- 4) 石山高、高橋基之(2009)アノードイックストリッピングボルタンメトリーによる地下水中無機ヒ素のオンサイト化学形態分析、水環境学会誌、Vol.32、No.2、pp. 93-98.
- 5) 古庄義明、牧田伸明、小野壯登、石山高、高橋基之、本水昌二(2007)固相前処理/金薄膜電極アノードイックストリッピングボルタンメトリーによる土壤抽出液中ヒ素のオンサイト定量、分析化学、Vol.56、No.12、pp.1165-1169.
- 6) 石山高、八戸昭一、佐坂公規、長森正尚、高橋基之(2007)埼玉県における鉛汚染土壤調査事例と鉛溶出量に影響を及ぼす因子、環境化学、Vol.17、No.1、pp. 59-68.
- 7) 石山高、八戸昭一、濱元榮起(2017)埼玉県中西部地域における地下水ヒ素汚染と鉄酸化物分別溶解法を適用した土壤から地下水へのヒ素溶出メカニズムの解析、水環境学会誌、Vol.40、No.3、pp. 135-143.
- 8) 石山高(2017)土壤中重金属類のオンサイト分析=土壤汚染対策に向けた環境測定技術の新たな展開=、検査技術、Vol.22、No.12、pp. 33-38.

### 7.2 競争的研究費リスト

- 1) 鉄鋼環境基金助成金 一般研究助成(2004~2005) 土壤中重金属のオンサイト汚染評価システムの開発(代表:石山高)、2,520 千円.
- 2) 科学研究費補助金 基盤研究(C)(2006~2008) 電気化学的手法に基づくオンサイト地下水汚染評価技術の開発(代表:石山高)、3,600千円.
- 3) 科学研究費補助金 基盤研究(C)(2013~2015) 鉄酸化物分別溶解法を用いた土壤から地下水へのヒ素溶出メカニズム解析手法の開発(代表:石山高)、3,900千円.

## 8 まとめ

平成15年からの7年間、著者が取り組んできた研究課題を図27に示す。当センターに着任後、一貫して土壤地下水調査を対象とした簡易分析技術の開発を進め、この開発技術を県内で発生した数多くの汚染対策事例に活用してきた。また、研

究開発の過程で得た重金属類の溶出特性及び汚染評価に関する学術的知見を基に、国や県の様々な行政施策に対して的確で有効な助言や情報提供を行ってきた。

民間企業との共同研究で開発したSV法による簡易分析は、都条例で準公定法として認められるとともに、国土交通省の“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<sup>24)</sup>”では、スクリーニング調査に用いることができる簡易分析技術として紹介されるまでに至った。現在では、社会実装化も進み、土壤汚染調査における主要分析技術の一つとして、国内の数多くの汚染現場で実用化されている。

土壤汚染対策では処理コストが膨大となるため、企業利益を大きく損なう場合がある。汚染範囲の絞り込みによる処理対策コストの低減は、土壤汚染対策の効率化や合理化を促進するばかりでなく、『環境と経済の両立』を推進するうえでも極めて重要である。今後も、全国各地の汚染現場で、SV法を用いた簡易分析技術が利用され続けることを切に願う。

## 謝辞

SV法を適用した簡易分析技術の開発では、多くの方々の協力があった。土壤汚染調査では、土壤地下水汚染対策チームのメンバーから数多くの支援があった。また、研究の一部については、海外からの研究生の協力があり、なかでも中国山西農業大学との関係は、その後10年以上も継続する当センターと中国山西農業大学との国際連携のスタートになった。著者が埼玉大学の連携教員を兼任していた期間では、多くの学部生や大学院生を受け入れて共同研究を実施した。

多くの方々の御協力に敬意を表し、ここに深謝いたします。

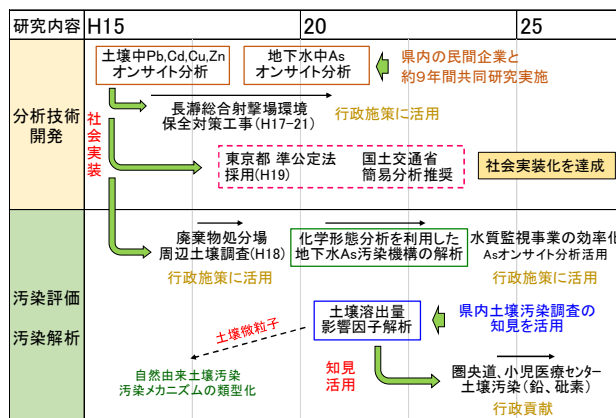


図 27 簡易分析に関する主な研究の流れ

## 文献

- 1) 環境省 水・大気環境局(2023) 令和3年度 土壤汚染対策法の施行状況及び土壤汚染調査・対策事例等に関する調査結果、URL. <https://www.env.go.jp/content/000158580.pdf> (2024年3月時点).
- 2) 環境省 水・大気環境局(2012) 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2版)、URL. [https://www.env.go.jp/water/dojo/gl\\_ex-me/pdf/full.pdf](https://www.env.go.jp/water/dojo/gl_ex-me/pdf/full.pdf) (2024年3月時点).

- 3) 環境省(2003) 土壤溶出量調査に係る測定方法(環境省告示18号)、URL. <https://www.env.go.jp/content/900540085.pdf> (2024年3月時点).
- 4) 環境省(2003) 土壤含有量調査に係る測定方法(環境省告示19号)、URL. <https://www.env.go.jp/content/900540086.pdf> (2024年3月時点).
- 5) T. Ishiyama et al. (1996) Determination of trace lead in copper by cathodic stripping voltammetry, *Analytical Sciences*, Vol.12, No.2, pp.263-265.
- 6) 石山高ら(1996) 示差パルスカソードイックストリッピングボルタンメトリーによる鋼中微量マンガンの簡易迅速定量、鉄と鋼、Vol.82、No.11、pp.923-928.
- 7) T. Ishiyama et al. (1996) Cathodic stripping voltammetry of selenium(IV) at a silver disk electrode, *Analytical Chemistry*, Vol.68, No.21, pp.3789-3792.
- 8) T. Ishiyama et al. (1997) Determination of selenium in stainless steel by differential pulse cathodic stripping voltammetry at a silver disk electrode, *Analytical Sciences*, Vol.13, No.1, pp.153-154.
- 9) 石山高ら(1997) 鋼中の微量硫黄定量におけるカソードイックストリッピングボルタンメトリーの改良、分析化学、Vol.46、No.4、pp.287-291.
- 10) T. Ishiyama et al. (1998) Determination of selenium in steel by differential pulse cathodic stripping voltammetry, *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, Vol.16, No.1, pp. 23-30.
- 11) T. Ishiyama et al. (1998) Cathodic stripping voltammetry of tellurium(IV) at a rotating silver disk electrode, *Analytical Sciences*, Vol.14, No.4, pp.677-680.
- 12) 石山高ら(1999) 無電解濃縮/カソードイックストリッピングボルタンメトリーによる銅および鉛中微量テルルの定量、日本金属学会誌、Vol.63、No.4、pp.515-519.
- 13) 田中龍彦ら(2000) ジフェニルカルバジドを用いた吸着ストリッピングボルタンメトリーによる鉄鋼中クロムの定量、鉄と鋼、Vol.86、No.3、pp.166-170.
- 14) T. Tanaka et al. (2001) Determination of antimony in steel by differential pulse anodic stripping voltammetry at a rotating gold film electrode, *Analytical Sciences*, Vol.16, No.1, pp.19-23.
- 15) 田中龍彦ら(2001) グラシーカーボンディスク電極を用いたモリブデン(VI)の示差パルスアノードイックストリッピングボルタンメトリー、日本金属学会誌、Vol.65、No.1、pp.60-63.
- 16) 石山高ら(2001) ケイ素(IV)の高感度ストリッピングボルタンメトリーとその鉄鋼分析への応用、分析化学、Vol. 50、No. 8、pp. 531-536.
- 17) T. Tanaka et al. (2001) Adsorptive voltammetric determination of orthophosphate at a glassy carbon electrode, *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, Vol.19, No.4, pp.591-599.
- 18) 田中龍彦ら(2002) 無電解濃縮/吸着ストリッピングボルタンメトリーによる亜硝酸イオンの高感度定量、分析化学、Vol.51、No.12、pp.1153-1158.
- 19) 石山高(2001) ストリッピングボルタンメトリーの金属材料分析への応用、ふえらむ、Vol.6、No.6、pp.415-418.
- 20) 広瀬一豊(2007) 埼玉県による分析技術交流会開催報告、環境と測定技術、Vol.34、No.9、pp.119-121.
- 21) 環境省 水・大気環境局(2008) 地下水質モニタリングの手引き、URL. <https://www.env.go.jp/content/900539358.pdf> (2024年3月時点).
- 22) 東京都環境局(2018) 都が選定した土壤汚染調査(揮発性有機化合物)の簡易で迅速な分析技術の詳細について、URL. <https://www.kankyo1.metro.tokyo.lg.jp/archive/chemical/soil/information/analysis/voc.html> (2024年3月時点).
- 23) 東京都環境局(2018) 都が選定した土壤汚染調査(重金属類)の簡易で迅速な分析技術の詳細について、URL. [https://www.kankyo1.metro.tokyo.lg.jp/archive/chemical/soil/information/analysis/heavy\\_metals.html](https://www.kankyo1.metro.tokyo.lg.jp/archive/chemical/soil/information/analysis/heavy_metals.html) (2024年3月時点).
- 24) 国土交通省 総合政策局(2010) 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)、URL. [https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/d11pdf/recyclehou/manual/sizenyuraimanyu\\_zantei\\_honbun.pdf](https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/d11pdf/recyclehou/manual/sizenyuraimanyu_zantei_honbun.pdf) (2024年3月時点).

# Stripping voltammetry based on-site analysis method for detecting heavy metals in soil

Takashi ISHIYAMA

## Abstract

Recently, soil contamination has become increasingly prominent and a major environmental problem. Because countermeasures for soil contamination incur high costs, there is a need for simple and rapid soil survey techniques for estimating contaminated areas to reduce treatment cost. Currently, various simple and rapid techniques are used for soil contamination analysis, and stripping voltammetry (SV), a highly sensitive electrochemical analysis technique, has been employed at various contaminated sites.

In this study, we developed a simple and rapid SV-based method for detecting hazardous heavy metals, such as lead and cadmium, in soil. To validate the method, it was employed to analyze soil contamination in Saitama Prefecture. Furthermore, discuss the social implementation of the developed method. Reducing the cost of soil treatment by narrowing down the contaminated area will not only reduce the economic burden on landowners but also promote the activation of land and urban development.

**Key words:** simple and rapid analysis, stripping voltammetry, heavy metals, soil contamination



[資料]

# 令和6年能登半島地震被災地における避難所運営支援業務と 在宅避難者の生活用水確保行動調査

柿本貴志

## 1 はじめに

令和6年1月1日16時10分ごろ、石川県能登地方でマグニチュード7.6(暫定値)の地震が発生した。この地震により、石川県の志賀町で震度7、七尾市、輪島市、珠洲市、穴水町で震度6強の揺れが観測された。令和6年2月28日時点での被害は、死者241名、負傷者1,299名、家屋の全壊、半壊が20,418棟、床上・床下浸水、一部破損が57,285棟となっている<sup>1)</sup>。石川県内の避難所数は480か所、避難者数は11,612名にのぼる。ライフラインを見ると水道の被害が深刻で、上述の5市町に能登町と内灘町を合わせた7市町で、最大約68,200戸の断水が発生し、2月28日現在でも約20,050戸が断水未解消となっている。電力は、発災時に約4万戸あった停電戸数は、2月28日現在710戸まで減少した。ガス関係については、住宅崩壊等により復旧困難な場所を除いて支障はない。七尾市、志賀町、穴水町、輪島市、能登町、珠洲市のガソリンスタンドは、69件中60件が営業可能となっている。これらのことから、水道インフラが地震被害を受けると、電気、ガスなどに比べて復旧までに時間がかかると考えられる。

これまで、平成7年の阪神淡路大震災や平成23年の東日本大震災などの地震により断水が生じた地域で生活用水が不足し、被災者の生活の質に悪影響を及ぼしてきた。そのため、災害発生時に生活用水を確保する手段の堅牢化(水道施設の耐震化など)、多重化(水道以外の水確保手段を備えておくこと)を進めていく必要がある。現在、災害時の生活用水として井戸水の活用が一つの重要な手段となっており、生活用水の確保が容易にできるような社会システムの構築が望まれている。これらのことから、土壌・地下水・地盤担当のメンバーは、令和4年度から「震災時生活用水確保困難地域の推定と防災井戸拡充による対応に関する研究」を実施している。筆者は令和6年能登半島の避難所支援に派遣され、現地の貴重な情報入手できたため、記録として残すことにした。

## 2 避難所支援、断水時の水確保実態調査の概要

### 2.1 避難所支援

筆者が担当した期間は、令和6年1月22日(月)から令和6年1月29日(月)の8日間であり、担当した避難所は、七尾市立天

神山小学校であった。

今回の避難所支援で行った主な業務は、炊き出しの支援、ゴミの回収・搬出、食料・支援物資の受け入れ・補充・管理、食料提供スペースや避難所物資の整理整頓、避難者向け食料の見直し、各種ボランティアによる支援環境の整備・避難者との調整、来客対応、日中に外出する避難者(仕事や自宅の片づけ等)が夜間に避難所に戻ってくる際の入所管理、日報の作成、引継ぎ資料の作成など多岐にわたった。

## 2.2 断水時の水確保実態調査

### 2.2.1 在宅避難者生活実態調査

避難所支援業務を担当した天神山小学校の種谷校長に、地域の被災状況や、地域住民の方々の生活用水確保状況に明るい方を紹介いただきたいと相談したところ、袖ヶ江地区地域づくり協議会事務局長太田氏と、御祓地区町会連合会防災部長大星氏のお二人を紹介された。ヒアリングは袖ヶ江地区コミュニティセンターの一室で実施した。

### 2.2.2 市内の井戸利用実態踏査

事前に大阪公立大学大学院現代システム科学研究科現代システム科学専攻遠藤崇浩教授から提供されていた井戸情報を参考として、市中心部の踏査を実施した。過去の調査から、断水から復旧すると、断水時に活用されていた井戸がどこにあったのか分からなくなるため、調査日(27日)時点で活用されていた井戸を特定することを重視して、踏査を実施した。井戸で水を汲んでいる人を見かけたときには声を掛け、井戸利用状況等についてヒアリング調査を行った。

## 3 現地の状況と支援の詳細

### 3.1 令和6年1月22日(月)

新幹線(9時9分大宮発)に乗りし、宿泊先ホテル(富山県高岡市内)に荷物を置いた後、避難所ごとのグループに分かれて避難所まで自動車で移動した(ホテルー避難所間は約50km、車で約1時間15分)。14時に避難所の天神山小学校(写真1)に到着し、引継ぎの後、15時より避難所勤務を開始した。夕方の炊き出し支援をした後、20時頃に夜勤担当と交代。21時半頃にホテルに到着し、一日を終えた。

天神山小学校とその近隣は、ガスと電気は復旧し、灯油も



写真1 勤務した天神山小学校

入手可能な状況であった。1月1日の地震で天神山小学校に避難してきた避難者は、最初体育館に入ったが、体育館があまりにも寒かったので、種谷校長の指示で暖房が使える教室に移動し、教室で生活していた。着任した22日時点で段ボールベッドが既に導入され、体育館避難をしている他の避難所より、快適な生活ができていたと思われる。学校関係者は、避難者を教室に入れるのを避ける傾向が強いという話を、避難所勤務と一緒に担当した市町村の方から聞いたが、これは授業再開が難しくなるためだとのことである。児童・生徒の学習環境を迅速に取り戻すことと、避難者にとって必要な生活環境確保が対立しないよう、避難所としても利用可能な施設が必要であると感じた。

### 3.2 令和6年1月23日(火)～24日(水)

大雪警報発令の予報があったため、交通事故予防の観点から、日勤と夜勤を担当する勤務に変更された。校内のゴミ回収、支援物資の受け入れ、食料提供スペースや避難所物資の整理整頓、来客対応、炊き出し作業の補助、自宅の片付けなどをして夜に避難所に戻ってくる避難者の入所管理、仮眠等をして24日の8時まで勤務した。

勤務を終えてホテルに戻る前に、七尾市の中心部を視察した。七尾駅前ロータリー、市危機管理部門の様子を視察した後、駅周辺を短時間だったが確認した(写真2～3)。七尾駅の駅前前は、近隣のビルにトイレカーが停車していることと店舗が休業していることを除いて、ぱっと見た限りで認識できる被害はなかった。しかし断水している地域であることに間違いはなく、インフラの被害は認識するのが難しいと感じた。市内の踏査では倒壊している建物や、応急危険度判定で危険マークが付された建物、生活用水を提供している井戸があることがわかり、地震による被害の大きさを目の当たりにした。

### 3.3 令和6年1月25日(木)

ゴミ捨て、来客対応、避難者の食糧・物資の管理、炊き出し支援等を行った。

### 3.4 令和6年1月26日(金)

ゴミ捨て、避難者向け食料の見直し(アルファ米や一部のお



写真2 七尾駅前(左)と市役所庁舎の入り口(右)



写真3 市役所1階ロビーに積まれた物資

菓子は消費されないもので、他の食料・お菓子を出す)、物資搬入・整理、炊き出し支援等を行った。避難所業務にも慣れ、どんな食料を出すかを選んでもらえるかを試行錯誤することや、食料の入れ替えに対する評価を求めながら、避難者とお話をする機会にするなど、避難所の中での過ごし方にも余裕が出てきた。この他、業務の空き時間を活用して、翌27日の調査準備(ヒアリング項目の整理、フィールド調査用のアプリ作成等)を行った。

### 3.5 令和6年1月27日(土)

休養日であったため、レンタカーを借り、県内市町村から派遣された職員と一緒に、発災後の生活に関するヒアリングと生活用水が提供されている井戸の調査を行った。詳細は「4 断水下の水確保行動調査」で述べる。県内市町村の職員は、災害時の生活用水の大切さについて強く認識することができたと感想を述べていた。各々の自治体における生活用水確保の議論が進展することを期待したい。

避難所の運営支援業務は、日勤の勤務時間が8時から20時までであり、高岡市内のホテルの往復も含めると、朝6時から21時半頃まで拘束される。私が知り合った応援職員は一律に、各所属に戻ったとき「避難所については説明ができるが、市内の被災状況や対応を説明することができない」と頭を抱えていた。市内の様子を観察し、各自自治体に知見を持ち帰れるような

配慮もお願いしたいと感じた。

### 3.6 令和6年1月28日(日)

ゴミ出し、食料・物資の補充、散髪ボランティアによる散髪の実施、環境整備・避難者との調整、来客対応、炊き出し作業の補助等を行った。

散髪ボランティアは広島県福山市から七尾市に入り、七尾市での活動の後に輪島市に向かうとのことだった。リーダーによると、平成27年の西日本豪雨の際にボランティアにはとても助けってもらったので、恩返しの気持ちから今回活動しているとのことだった。散髪したことで特に女性は表情が明るくなり、行動も活発になった気がした。考えてみれば地震発生から約1か月が経ち、髪も伸びる頃である。その心配りの細やかさに感心させられた。

昼食は日清食品から提供された。日清食品は、阪神・淡路大震災から被災地の食糧支援を行っているとのこと、被災地支援の経験をいくつか聞かせていただいた。お話を伺った方が被災地を訪ねた経験の中でも一番衝撃を受けたのが、東日本大震災の津波被害を受けた陸前高田市を訪れたときで、高台から見えるはずの街がすっかり消えていて、とても恐ろしかったとのことだった。また、支援しているどの被災地でも共通するのは、支援に来ている自衛隊や自治体職員は、炊き出しを受け取ろうとしないとのことだった。お話を伺った方は、“支援する側も元気でいてもらわないといけない”という思いから、支援する側にも食べてもらう方法を編み出したとのことだった。詳細はあえて記載しないが、編み出した方法を実行すると、頑なに断る自衛隊・自治体職員でも食べてくれるとのことだった。

### 3.7 令和6年1月29日(月)

通常業務のほか、引継ぎ資料の作成、記念撮影などをして過ごした。14時ごろに後任の2名が到着したため、学校内の案内と業務の説明を行い、15時ごろ避難所を出発し、避難所の運営支援業務を終えた。

大宮駅で新幹線を降りると、そこは完全にいつもの大宮であった。つい数時間前まで能登半島地震の被災地で困難な生活を送っている人が居たこと、目の前の光景の乖離が大きく、駅構内を歩いていて僅かに頭が混乱した。

被災地の状況は報道や研究報告等からでも把握可能と考える向きもあるが、やはり現地に入り、現地の方とのやり取りから得られる情報は大変貴重な情報である。また現地に入ったからこそ構築できる人脈もあり、これらは今後の大変貴重な資産となった。

## 4 断水下の水確保行動調査

### 4.1 被災後の生活や生活用水確保に係る情報収集

1月27日の調査では、天神山小学校の種谷校長に紹介された袖ヶ江地区地域づくり協議会事務局長の太田氏と御祓地区町会連合会防災部長大星氏のお二人からお話を伺った。

### 4.1.1 袖ヶ江地区地域づくり協議会事務局長 太田氏

#### (1) 旧市街の形成過程と袖ヶ江地区の現在

七尾市の旧市街(袖ヶ江地区を含む地域)は、前田利家が小丸山城を築城するときにこの地域に来た様々な職人が住み着き、形成された。太田氏の小さいころには、この地域の各世帯には井戸があり、手漕ぎポンプで井戸水を汲んでいた。その後、水道(七尾市の岩屋を水源とするもの)が整備されたが、夏季の湧水が頻発するようになり、手取川(七尾から100km以上離れたところ)から送水する現在の形になった。袖ヶ江地区は19町会、約1,100戸、約2,500人が暮らしている。30年前は約5,000人いたが、30年で半減した。若い人は郊外(山の方)に移動し、ドーナツ化現象が進んでいる。

#### (2) 困ったこと

##### ア トイレ

トイレに関する市役所の最初の指示は、新聞紙に汚物を出して、可燃ごみとして出すようにとのことだった。しかし、なかなか収集してもらえなかったため、トイレを使うようになった。自宅を10年くらい前に建て替えたので、自宅のトイレは一回7Lで済むが、知り合いの昔のトイレだと20Lくらい水を使う。いくつもポリタンクを持っている友人に聞いたら「トイレ1回で20L使う。やってられない」と言っていた。浄化槽を使用している知り合いはトイレが使えていた。

##### イ その他の水利用

洗濯、お風呂、食器洗いもできなくて困った。文明生活が全部ストップする。上下水道と電気が文明の元。お風呂は氷見まで行っていた。市内の公衆浴場が開設されるようになって、そちらに行くようになった。市内に3か所。最初は氷見のスーパー銭湯に3日に一回くらい行っていた。

#### (3) 水の入手方法

飲み水は市役所で配布されているペットボトルを使った。毎日1世帯1ケース配布されている。1ケースは2L×6本、または500mlが24本。2Lが9本の場合もあった。歯磨きや飲み水はペットボトルの水。炊事を全てペットボトル水でやっていたら大変な量が必要だから、味噌汁や炊飯は種谷校長の家の井戸水を使っている。

ご飯はパックご飯を買ってきていた。今でもそうしているところもある。通常通り炊飯すると、水が不足するから。水道がない間は水だけではなく、パックご飯も配らないといけないと思う。トイレの水はSさん宅の井戸水を使う。Mさんの井戸は自噴していたが、蛇口で止めていたので水質は劣ると認識している(筆者注:井戸水の色や臭いだけでなく、平時から自噴する井戸水を流し放しにするか否が水質に影響するという視点が存在している)。この認識は地域の皆さんで同じではないか。

#### (4) 井戸の存在を地域に周知する方法

地域の方には1月3日に回覧板を回した。種谷校長の母から”井戸を開放することを回覧板に記載して良い”との許可をもらったから。ただ、種谷校長宅で井戸水が使えなくなるくらいの行列が出来たら申し訳ないので、近隣の人だけに知らせた。

他の町内にも井戸がある。各町内には自噴している井戸が

残っている。飲食店関係の人は水道だけでは費用が大変なので井戸を残している。このような井戸がなかったら、自宅での生活はできなかったから、避難所に押し掛けただろう。この地区だけで2,500人だから、避難所もどうしてよいか分からないくらい混んでしまったのではないかな。

#### (5) 水運搬が大変な高齢者への支援

近隣住民による高齢者への支援はなかったと思う。公的な支援もない。水1ケースを貰えると言っても、持っていけない人がいる。

#### (6) 井戸端会議の中身

地域住民による井戸の使い方において、大きな課題はなかった。水汲み待ちの行列は多いときで4組くらい。待っていることが苦痛になる程ではなく、待ち時間で「井戸端会議」が行われていた。井戸端会議では、銭湯やコインランドリーの営業再開情報などの生活関連情報を共有でき、とても有用な情報が得られた。

#### (7) 井戸活用に対する市の考えに関する推察

七尾市からは、「下水道で詰まったり配管が破れたりしたところがある恐れがあるから、井戸水は使わないように…」という話もあった。市としては井戸利用を認めると、その品質保証ができていないので、何かトラブルがあった時に責任が問われることを恐れているのではないかな。

### 4. 1. 2 御祓地区町会連合会防災部長 大星氏

#### (1) 今回の震災で困ったこと

##### ア 水の確保

みんな水で困っている。市内の水源は自己水(七尾市内の水源)と県水(手取川から取水し金沢の浄水場から送水するもの)があるが、県水の地域で断水している。近隣の井戸(種谷校長と駐車場の井戸2か所)に毎朝・毎晩汲みに行くが、さすがに疲れる。車で汲みに来る人もいる。大学生の息子が台車を持ってきてくれて水運搬に役立った。簡易ポンプも役立った。

井戸水は洗濯(洗濯機)に使用する。一回当たり60Lから100Lほど。容器はポリタンクを使用した。水汲み作業は重労働。仕事に行っても電話もファックスも使えず、仕事にならない。こういったことで精神的なストレスが溜まる。明るい話題もない。いまは氷見の銭湯に行けるのが唯一のリラックスで週1~2回くらいの頻度で行っている。お風呂については、知り合いがお風呂に入りに来ていいよと言ってきて、そこに行くことがある。元旦から10日間くらいは風呂にも入れなかった。水汲みは本当に大変。また水か、また水か…が延々と続く。

しんどいのはトイレで、今でも凝固剤を使っている(筆者追記:この時点で発災から約1か月)。輪島はトイレの状況がもっと酷いらしく、最近、輪島から来た人が七尾のトイレを使った時「気持ちよくトイレが出来た」と喜んでいて、トイレは当初自宅の庭でやった(新聞紙を敷き、その上で排便。尿はビニール袋に液体のまま入れた)。ゴミの回収がしばらくなくて、自宅に多数排泄物が溜まった。尿は震災後1週間くらいたって回収が始まった。大便の回収は、今週くらいかな?一番しんどいのはトイレで、いまでもゾッとす。今でも一回一回凝固剤を使って袋

を縛っている。正月に子供と姉が七尾に帰ってきたので、正月明けに送りに行った。途中のサービスエリアでトイレに寄ったが、とても気持ちが良かったと言っていた。水の有難みが本当に分かった。

水は命に係わるから料金の不払いが続いても、水道はなかなか止めないと聞いたことがあるが、その意味がよく分かった。水がないと完全にアウト。水の摂取を避けるのは、トイレがしんどいからだが、水の摂取を控えているから体調は悪い。自宅の下水道は使えなくなったが、浄化槽の家は使えたところが多いようだ。

近隣の井戸(種谷校長宅の井戸)は、当初水汲みをしづらい構造だったため、水を汲むために大分待った。長い時は1時間くらい待った。ガス配管工(Tさん)の子供が、井戸につきっきりで水汲み作業を支援した。またもう一つの井戸は、水を受ける容器としてベビーバスが提供されて以来、水汲みがしやすくなった。行列への横入りなどの問題もなく、良い地域であると思えた。最初はみんな水がないから行列もできたが、いまは各家庭でいくらかストックもある。そのお陰で行列が出来なくなった。

種谷校長宅の井戸は、お母さんが「使ってください、使ってください」というので、地域の方は助かった。順番も守るし、水汲みが終わった人は、その後の人に配慮して対応できた。井戸の情報は町会長が回覧板で知らせ、2~3日で回せた。井戸水使用時のトラブルは特になかったと思う。

近くに御祓川(みそぎがわ)があるが、生活用水としての使用は100%無理。非常に汚い。川の水は汚いので、井戸以外の選択肢はなかった。

##### イ ガソリン

津波警報により避難したが、車中避難の人が多数いた。車で暖房を使うのでガソリンが減り、開いているガソリンスタンドに人が集中して大行列が発生した。給油は1回10L制限で、230円/Lくらいが1週間くらい続いた。大星さん自身は行列に並ぶことにより、ガソリンがさらに減ってしまうと考え、行列に並ぶのを断念したが、結果的には良かったと判断されている。

#### (2) 地域経済の状況

会社の再開は見通しが立たない。建物を修繕して商売を再開する気力があるか?という厳しい。奥能登はもっと厳しい。七尾の多くの会社では地震以前から「高齢化問題」「跡継ぎ問題」があり、そもそも会社を続けていくかという問題があった。そこに今回の地震の打撃があった。2007年能登半島地震の時もお金をかけてやって建物を修繕しているけれど、今度の地震でも被害が出た。今度は修繕では厳しいだろう。コロナが終わり、「さあこれからだ!」という時に被災した。多くの建物は修繕では無理で、建て替えをしなきゃいけない。経営者はこのトリプルパンチ(高齢化問題、跡継ぎ問題、地震被害)で心が折れてしまった。経営している世代は50~60歳代が中心。もともと自分の世代で終わろうと思った経営者が、今回の地震をきっかけに店を閉じてしまう。七尾市は人口が約5万人で、毎年1,000人くらい人口が減少している。地震で5千人くらいは戻らないのでは…という予想がある。そんな中でお店を再開するか



という問題である。

大手チェーン店は強い。ワイン、ビールが割れていても商売していた。小規模商店の対応が遅いのは仕方がないが、大手チェーンは既にチラシを入れていて、チラシには災害時の必要物資が書かれている。大手には勝てない。地元商店離れは進んでしまうだろう。大手は評価を上げ、違いを見せつけられた。地元の商売は厳しい。七尾の中心産業は観光業、サービス業。製造業は七尾に水がないから弱い。従業員を50人集めようと思っても集まらない。能登と加賀だったら加賀に行きたいという。断水により水がなくて営業を再開できないという問題ではない。それ以前の問題だ。

まだ発災から1か月だが、今後様々な請求(電気、ガス、水道、その他)が溜まって、経営に対する影響が顕在化してくるだろう。七尾市の経済は非常に厳しい。昔からの人気があるお店(高沢商店:和ろうそく店、中山薬局:医薬品化粧品、ともに一本杉通)も被災した。地域に親しまれていたの、恐らく七尾市民は皆衝撃を受けている。国・県・市の支援の状況が分からないうちは、会いに行くこともできない。

### (3) 避難に係る課題・高齢者のサポート

高齢の母親がいるが歩けない。たまたま電動車いすをレンタルしていたから避難できた。避難先は屋外で寒かったが、それでも車いすに座って居られたからよかった。知り合いの家では、大津波警報が出て「動けないからもういい」と死を決断した高齢者もいた。避難所に赤ちゃんを抱えた夫婦がいたが、ミルクは無く、泣くし、寒い。避難するなら新しい建物に行くべき。暖房が効かないし物資がないから。支給された食糧はひと家族6人でビスコ1箱だけ。

3.11があったので津波警報が出て動揺した。半日位で解除され家に帰れると思ったが、帰るまで一晩かかった。家を出るまでに十分な防寒対策をする時間も無く、避難先では寒い思いをした。病院避難の人はおかゆや水を提供されたい。新しい避難所に避難するのが大切。津波警報が解除されたら家に帰った。電気は使えたので家は暖かくできたが、そこで困ったのは水。避難場所も冷暖房完備が必要。プロスポーツは冷暖房完備の体育館でないと使わないというので、今後はそういう体育館がいい。暖房がないから車中避難者が出た。雪がなかったからよかったけど、雪が降っていたら車中で一酸化炭素中毒になることも考えられた。

高齢者の近隣に住む若い人が、配布される飲料水(ひと世帯1箱)を取る際、自分と近隣の高齢者の2箱を持って家に帰ろうとしたら、「なんで2つ持っていくんだ!」と言われた。親切にしているのに泥棒みたいな言い方をされて嫌な気持ちをした。殺伐とした雰囲気がある。

昔の七尾市内は「鍵を閉めなくても大丈夫という安心感」があったが、いまは知らない人が多くなり、頑張ろう!という一体感がない。一体感がないことは今回つくづく感じた。井戸の情報を記した回覧板を回したら、いいことを言ってくれる人と、「今頃何を持ってくるんだ」という人もいた。町会長も嫌な思いをしているはず。みんな自分のことを脇に置いてやっているのに文句ばかり言う人がいる。そう考えると、行政は本当に大変

だと思う。大学生の息子が七尾に戻ってきて、トラックで家一軒一軒に水配布をするボランティアをしようとしたが、水を貰った/貰っていない、自宅に居た/居ないのトラブルが予想され、嫌な思いをすることが予想されたから、各戸配布は断念し、コミュニティセンターの入り口に水を置いておく対応となった。この方法なら文句は出ないが、高齢者にとっては厳しい対応になったと思う。

### (4) 他県からの支援に対する感情

ボランティアできていただける人のお陰で助かっている。今の七尾市内は、来ても泊るところがない、トイレはない、水はない、風呂はないという状況だが、ボランティアをしてくださる。七尾市以外の給水車をいくつも見た。涙が出る。全国からきてくれている。自衛隊にも頭を下げた。つくづく思う。

### 4.1.3 市内踏査

市内踏査は、遠藤教授がインターネット上にある情報を整理して作成した地図に示されている井戸を訪ね、写真撮影することと、現地で可能な限りヒアリングをすることとした。同行者に夜勤予定の職員が居たため、踏査は16時には調査を終了しなければならず、踏査時間は3時間となった。

結果を図1に示す。遠藤教授が事前に示した井戸の多くを確認することができ、かつ未発見の井戸を多数発見することができた。現地でのヒアリングの概要は以下のとおりである。

#### (1) 地震後の行動

地震発生直後に大津波警報が発出され、沿岸部に住む人々の多くは(一部は街中に留まる)は標高の高い場所に移動した。そのまま1日過ごし、注意報が解除された2日10時には多くの人々が自宅に戻った。自宅に戻ると水道が断水しており、不自由な生活が始まったとのことである。

#### (2) 井戸を知ったきっかけ

断水していることを認識した住民が困っているところに、町会長が直接、または回覧板を通じて井戸情報を町会内に知らせた。以後、近隣の井戸から生活用水を確保しようとする生活が始まった。



図1 踏査経路(青点線)と生活用水提供ポイント  
※踏査経路以外の井戸は車で移動したもの

#### (3) 井戸水の用途と運搬に関する課題

井戸水の主な用途は生活用水であり、トイレ、皿洗い、洗濯という人が多かった。発災後に水質検査を実施し、飲料水質

基準に合格した井戸については飲用している人もいた。また水質検査をせず、煮沸消毒後に飲用したという話もあった。

井戸水を汲んで風呂に使用するという回答は少なく、風呂は氷見や高岡まで入りに行くか、井戸を持っている親戚の家で済ませるといった対応が多かった。またトイレ用水は雨水(雪解け水を雨どいから確保したもの)を用いている家庭もあり、水の運搬は身体的な負荷が高く、水汲みの回数を減らしたいという意識があるように思われた。

井戸が駐車場に隣接している場所は、車が絶え間なく来て水を汲んでいる。このような人の多くは20L程度のポリタンクに水を汲み運搬している(写真4)。車で来場する人の中でも高齢女性の場合は、20Lタンクを持たず、2~3L程度の給水バッグを用いている例があった。移手段が限られている人々(特に高齢女性)は、2Lペットボトルを数個、自転車の荷台に乗せて運搬していた。2Lのペットボトルがなくて困っている人も居て、避難所の炊き出しで発生した空のペットボトルを炊き出しボランティアに箱ごと渡し、炊き出しボランティアの手で近隣の人に配ってもらった。また炊き出しボランティアの女性6名に尋ねると、水が重くて運ぶのは大変と口を揃えていた。こちらの女性たちも、時間があれば生活用水の話をしており(どこで水が得られる。重くて大変だったという内容が主)、駐車場があれば車が使えるので、駐車場の存在はやはり大きいと言っていた。

以上のとおり、井戸がある事により水が確保でき、生活を成り立たせることが可能になったが、水運搬に多大な苦勞を伴うことが大きな課題であることが認識できた。車を使えない、力が弱い人は生活弱者になるため、その実態把握や自治会等の地域社会による支援、生活弱者のことに配慮した水輸送方法を構想していく必要がある。



写真4 タンクを車に積み込む市民

#### (4) 井戸の共同利用を不能にする事例

市民の共助意識が高く、井戸の良好な共同利用事例と言えるものが多数存在する一方で、井戸所有者の怒りを買うような事例も確認できた。写真5はスーパー(石川県七尾市矢田新町)の蛇口に張り出されていたものだが、ゴミを捨てていく事案が急増しているため、給水制限する可能性に言及している。こ

の他にも水提供を止めた事例があり、井戸所有者が不利益を被らないような仕組みが必要であると思われる。



写真5 スーパーの事例

#### (5) 洗濯機の貸し出し

井戸水を提供している家庭のいくつかでは、洗濯機も貸し出していた(写真6)。洗濯機専用の蛇口を設けているため、洗濯機使用中でも水汲みができるようになっている。水運搬に比べて、洗濯ものの運搬の方が楽であり、このような洗濯機の貸し出しは、断水時の効果的な施策メニューであると考えられた。



写真6 洗濯機を開放していた事例

### 5 おわりに

水道が断水することによる日常生活への影響として、トイレが最も重要な問題であることが異口同音に述べられた。また、民間の井戸が開放され、災害時に多くの市民が活用できたことで、旧市街の住民(約2,500人)も含め、多くの市民が自宅で生活再建に向けて動き出すことができ、その分避難所にも余裕が生まれたであろうことが指摘された。

「災害関連死を防ぐ」という言葉がマスコミでは喧伝されるが、よりよい生活環境や、生命維持のための選択をした結果としての「在宅避難」に対する公的な支援が、生活用水に関しては十分に実施されていないことが示唆され、災害時の水供給の実態把握と課題把握のための研究が必要であると感じた。

筆者が踏査した七尾市旧市街は井戸が数多く存在したお

陰で、相対的には水を確保しやすい条件であったと思われるが、以下の課題が挙げられる。

- ・ 断水時に利用可能な井戸に関する平時からの情報共有
- ・ 断水時の水運搬を想定した容器、台車等の備え
- ・ 身体が不自由な方、高齢者などを含めた水運搬への配慮・支援
- ・ 井戸を開放していた井戸所有者が被る不利益への備え、救済制度
- ・ 地域の人々の信頼関係維持
- ・

埼玉県内でも井戸を活用した災害時の生活用水確保策を想定している市町村がある。本調査の調査経験を災害に少しでも強い体制整備にこれらの経験を活かしたい。

## 謝 辞

今回の市内踏査は、大阪公立大学の遠藤崇浩教授がインターネットの情報を整理して作成した地図を参考にして実施しました。ここに記して感謝の意を表します。

また、被災地支援業務に携わっていただいた関係者の皆様及びインタビュー等に協力していただいた被災者の皆様に心より感謝申し上げます。最後に、能登半島地震で被災されたすべての方々にお見舞い申し上げるとともに被災地の早期の復興を祈念いたします。

---

## 文 献

- 1) 非常災害対策本部(2024) 令和6年能登半島地震に係る被害状況等について(令和6年2月28日 14時00分現在),  
[https://www.bousai.go.jp/updates/r60101notojishin/r60101notojishin/pdf/r60101notojishin\\_34.pdf](https://www.bousai.go.jp/updates/r60101notojishin/r60101notojishin/pdf/r60101notojishin_34.pdf) (2024.3.8アクセス)