

沖縄市における地下水水銀汚染について

吉田直史, 上地さおり, 玉城不二美, 渡口輝, 大城洋平, 宮城俊彦, 安里直和¹⁾, 上原強²⁾

Underground water pollution by mercury at Okinawa city

Naofumi YOSHIDA, Saori UECHI, Fujimi TAMAKI, Akira TOGUCHI,
Yohei Oshiro, Toshihiko MIYAGI, Naokazu ASATO and Tuyoshi UEHARA

1)現畜産研究センター 2)環境保全課

要旨: 昭和57年沖縄市内の井戸から総水銀が地下水の水質汚濁に係る環境基準を超えて検出された。その後の調査により市内の複数の地区の井戸で水銀が検出され、汚染が広範囲に及ぶことがわかった。当地域には米軍基地や廃棄物処分場が存在し、人為的汚染が疑われてきたが、汚染源の特定には至らず、原因究明は困難を極めていた。そこで新たに水銀蒸気検出調査を行ったところ、断層等地盤の割れ目に沿って地下深部から上昇した水銀蒸気が地下水に溶解したことによる自然由来の汚染の可能性が高いことが推察された。

キーワード: 井戸水, 水銀汚染, 水銀蒸気, 断層, 自然由来

I はじめに

昭和57年に行われた沖縄県企業局による井戸水質検査において、沖縄市内の井戸から総水銀が地下水の水質汚濁に係る環境基準(0.0005mg/L以下)を超えて検出された。

その後の調査により、沖縄市内において総水銀が基準を超えて検出された地点は述べ27地点にのぼり、広範囲で汚染が確認された。汚染の特徴として、総水銀濃度が基準値程度で検出された地点が多く、継続して基準を超えて検出される地点は少ないことがわかった。また、アルキル水銀については一度も検出されることがなく、当地域の汚染は無機水銀によるものである。

当地域には米軍基地や廃棄物処分場が存在し、人為的汚染の可能性が疑われてきた。汚染発見の当時からボーリングや水質、土壌、底質分析等の様々な調査が行われてきたが、汚染源を見いだせない状況が続き、長い年月も経っていることから原因究明については困難を極めていた。そこで当地域と同じ本島中部に位置する石川市（現うるま市）や福岡市において、地下水水銀汚染が地下深部から上昇した水銀蒸気による自然由来のものであると推定されたことから、当地域においても自然由来の汚染の可能性を検討するため、石川市の事例^{1),2),3)}や福岡市の事例⁴⁾を参考に調査を行った。

II 調査方法

1. 地下水調査

沖縄市内の井戸8地点湧水1地点について、平成17年4月から翌年3月までの1年間月1回の頻度で採水し、水銀及びイオン成分等の分析を行った。また、水質についてトリリニアダイアグラム解析を行った。分析方法については総水銀、イオン成分等各項目ともJIS K 0102又は上水試験方法に準拠して行った。

2. 水銀蒸気検出調査(金線調査)

水銀は金属でありながら揮発性が高く、温度の高い地下深部や地熱地帯では、水銀蒸気濃度が高い状況にある。水銀蒸気は断層等地層の隙間に沿って上昇し、地表付近に至るとされる^{5),6)}。このメカニズムは、地熱(温泉)探査や断層分布調査に応用されている。当地域には温泉はないものの、地域の中央を東北東—西南西方向に横切る断層が分布し、また地域の西部を中心とした地下水盆の形成に伴う複数の正断層の存在が推測された^{7),8)}ため、これらに沿って上昇した水銀蒸気が井戸水に溶解したのではないかと考え以下の調査を行った。

(1) 表層土壌中水銀蒸気検出法(ピット法)

130地点において径約8cm、深さ約30cmの縦穴を掘り、あらかじめ加熱気化(750℃)により水銀を除去した金

線（直径1mm，長さ10cm，純度約100%）を縦穴中に糸で吊した。穴の入り口を厚紙で覆い，5日間設置後金線を回収し，加熱気化水銀分析装置を用いて水銀蒸気捕集濃度を測定した。

(2) 深層土壤中水銀蒸気検出法（ボーリング法）

当地域の地質は，帯水層である琉球石灰岩層の上部に不透水層で通気性の悪い粘土層が分布している。従って，地表付近においては地下深部から上昇してくる水銀蒸気が到達しづらい地盤環境にある可能性がある。そこで，透水層までボーリングすることにより高濃度の水銀蒸気を捕集できるであろうと仮定し，以下の方法で調査を行った。

15地点において，原則3深度を試験区分とした。その内訳は，まず粘土層を突き抜け琉球石灰岩層に至ったところからさらに50cm深くまでボーリングし，下方から上昇する水銀蒸気のみを捕集するためその孔に塩化ビニル製パイプを通した部分（透水層部），比較対照として，地表から50cm掘削した部分（表層部），基盤上部（盛土直下）を50cm掘削した部分（中間部）とした。ピット法と同様に5日間金線を設置後回収し水銀蒸気捕集濃度を測定した。

3. 土壌調査

土壌汚染対策法に基づいて，当地域の表層土壌60地点，ボーリングコア5地点（62検体）の土壌溶出，土壌含有試験を行った⁹⁾。また，2.(1)のピット法により掘削した際に得られた表層土壌130地点の含有試験を加熱気化水銀分析装置を用いて行い，ピット法による水銀蒸気濃度との相関を調べた。

III 結果及び考察

1. 地下水調査結果

沖縄市内の井戸8地点湧水1地点について，1年間月1回の頻度で採水し，総水銀及びイオン成分等分析を行った。採水地点について，現在（ここ数年）水銀が検出される井戸を6地点，過去に検出されたことのある井戸及び湧水を1地点ずつ，不検出の井戸を1地点とした。その結果，6地点で総水銀が基準(0.0005mg/L以下)を超えて検出され，全地点において<0.0005~0.0013mg/Lの範囲であった。基準値を超えた6地点の検出状況（検出された月のみ表示）を図1に示す。地点W-2において5ヶ月検出され比較的多く検出されたが，他の地点では1，2ヶ月とわずかな頻度であった。

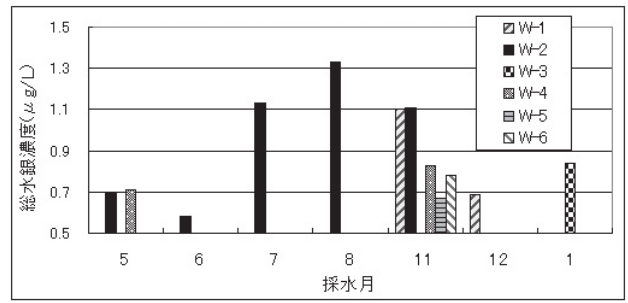


図1. 6地点の総水銀検出状況

全地点において，総水銀と測定した全ての項目（水温，pH，EC（電気伝導度），ORP（酸化還元電位），Na⁺，K⁺，Ca²⁺，Mg²⁺，NH₄-N，F⁻，Cl⁻，NO₃-N，NO₂-N，SO₄²⁻，PO₄³⁻）とでは強い相関は認められなかった。

また，降雨が水銀濃度に影響を及ぼすだろうと思われたが，全地点で水銀濃度と降雨量（沖縄市胡屋での観測値，気象台発表）との間にも強い相関は認められなかった。

全地点の水質のトリリニアダイアグラム解析結果を図2に示す。解析結果によると，全ての地点で浅層地下水の一般的な水質を表すII型（アルカリ土類炭酸塩型）に属することがわかった。当地域では琉球石灰岩層を帯水層としており，水銀検出井戸と不検出井戸で同様な水質を示した。また，図2では平成17年11月採水の試料の例であるが，一年を通してほとんどプロット位置に差はなく，水質が安定していることがわかった。

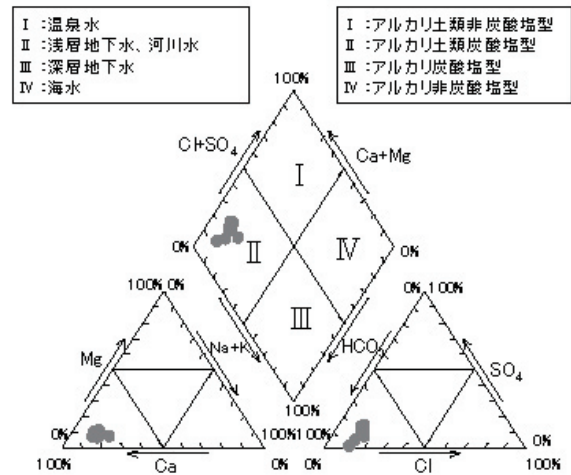


図2. 9地点の水質トリリニアダイアグラム解析

2. 水銀蒸気検出調査(金線調査)結果

ボーリング法による15地点における深度別水銀蒸気濃度図を図3に示す。15地点中5地点(No.3,8,9,10,12)で，表層部，中間部より顕著に深部の透水層部で水銀蒸気濃度が高いことがわかった。これは地下深部から上昇してきた水銀蒸気をより高感度に捕集したものだと考えられ

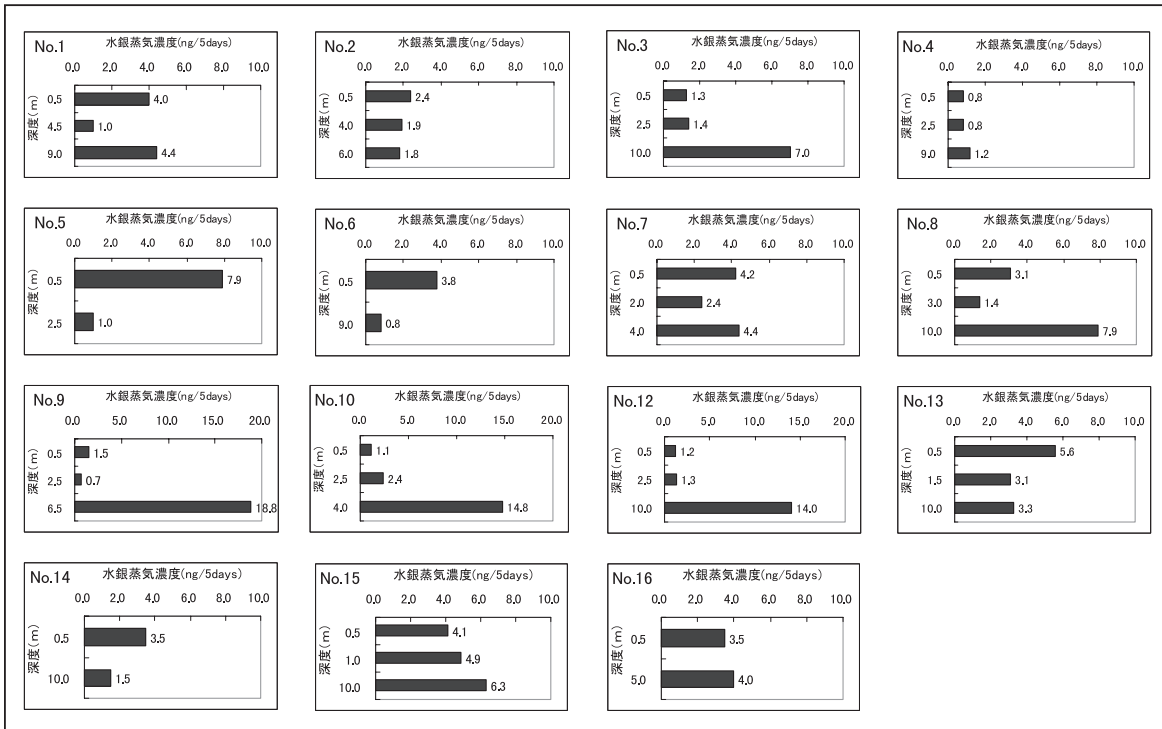


図3. 深度別水銀蒸気濃度

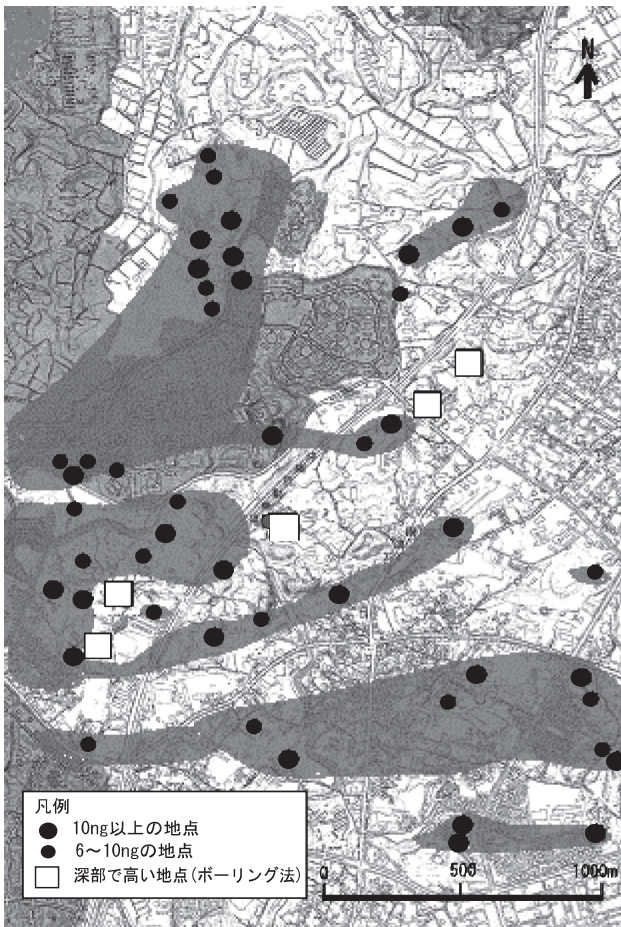


図4. 水銀蒸気高濃度ゾーン

る。なお、残りの10地点については不明瞭な結果であるが、断層の不均一性を反映しているものと思われる。

ピット法による130地点における水銀蒸気捕集濃度は0.2~36.4ng/5daysであった。これをもとに水銀蒸気高濃度ゾーンを作成したものを図4に示す。ただし、図4では6ng以上の地点を示している。ゾーン作成は低値の地点も含めて、また地域の中央を横切る推定断層の東北東—西南西方向も含めて考慮している。さらに、ボーリング法により深部の透水層部で水銀蒸気濃度が高かった5地点もプロットした。

水銀蒸気高濃度ゾーンは広範囲に及んでおり、このことが、地下水が広範囲に汚染されたことの原因であると想定される。また、この水銀蒸気検出調査からは明瞭な断層は見いだせないが、当地域には西部を中心に広く地下水盆が存在し、これを形成した時の断層運動による地盤の割れ目が水銀蒸気の上昇ルートとなっていると想定される。

3. 土壌調査結果

一般に、水銀は土壤中に0.04~0.8mg/kg存在すると報告¹⁰⁾されている。また、土壌・地下水中汚染に係る調査・対策指針運用基準¹¹⁾では、土壌中の含有量参考値を「これを上回れば何らかの人為的負荷があるものと認められる値」と位置づけ、総水銀では3mg/kgと設定している。

土壌汚染対策法に基づいて、表層土壌、ボーリングコアの土壌溶出、土壌含有試験を行ったところ、土壌溶出試験では全検体で不検出、含有試験では<0.01~0.25mg/

kgであった。

また、当地域の表層土壌130地点の含有試験（加熱気化法）を行ったところ、0.01～0.90mg/kgの範囲にあり、中央値は0.13mg/kgであった。

よって沖縄市内の土壌中水銀含有量は自然一般レベルの濃度であり、人為的土壌汚染からの地下水汚染は考えにくいと思われる。

また、ピット法による水銀蒸気濃度と同一地点における表層土壌中水銀含有量との関係を図5で示す。ばらつきはあるが、水銀蒸気濃度が高い地点は土壌中水銀含有量も高い傾向があるようにみえる。

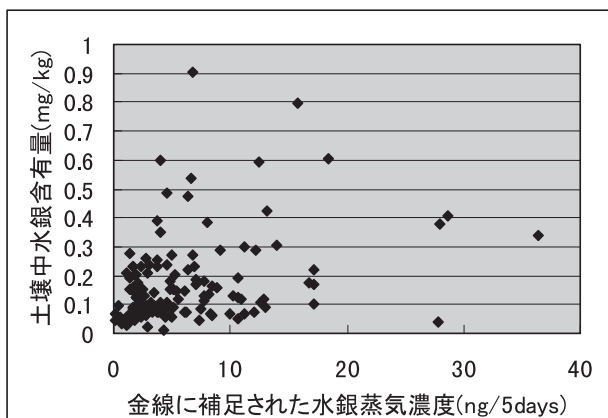


図5. 同一地点における表層土壌中水銀含有量と水銀蒸気濃度との関係

また、既存資料¹²⁾から得られたボーリングコアの土壌含有試験結果をボーリング柱状図とともに図6に示す。不透水層と透水層が存在するボーリング孔B-1,B-2,B-7は下部が透水層、上部が不透水層からなり、コアの水銀含有量は、「不透水層/透水層」境界付近で高い結果となっ

ている。

B-4,B-5,B-6は不透水層地盤のボーリングで水銀含有量は低い。B-3は粗粒な透水層と細粒土からなる不透水層の繰り返しが見られ、これが水銀含有量の増減の変化を生んでいるように思われる。

地表付近に水銀汚染源があり、汚染が浸透したと考えられると、コアの上部よりも下部で水銀含有量が多いことが説明できない。一方、深部から水銀蒸気が透水性（透気性）地盤内を上昇し、不透水性（不透気性）地盤の下部で溜まり、ここで粘土土に吸着されたと考えると地盤条件と調和的に説明できる。

5. 井戸水の水銀汚染メカニズム

汚染井戸付近の地下に断層等の地盤の割れ目が存在し、それに沿って水銀蒸気が上昇する。帯水層である琉球石灰岩層中には粘土層が不均一に存在し、琉球石灰岩層と粘土層の境界面で水銀蒸気が高濃度に集積され、それが井戸水に溶解する。近接する非汚染井戸は、派生断層から上昇する水銀蒸気の影響を直接受けない位置にあるか、影響を受けても不均質な粘土層により、井戸水への溶解が微量もしくは阻害されていると考えられる。

IV まとめ

沖縄市内の井戸から、総水銀が地下水環境基準を超えて検出された。当地域には米軍基地や廃棄物処分場が存在し、人為的汚染の可能性が考えられてきたが、汚染源の特定には至らなかった。そこで今回新たに水銀蒸気検出調査を行った。その結果、水銀蒸気高濃度ゾーンが広範囲に分布し、ボーリング法による深部での水銀蒸気濃度が表層部での値より顕著に高い地点が15地点中5地

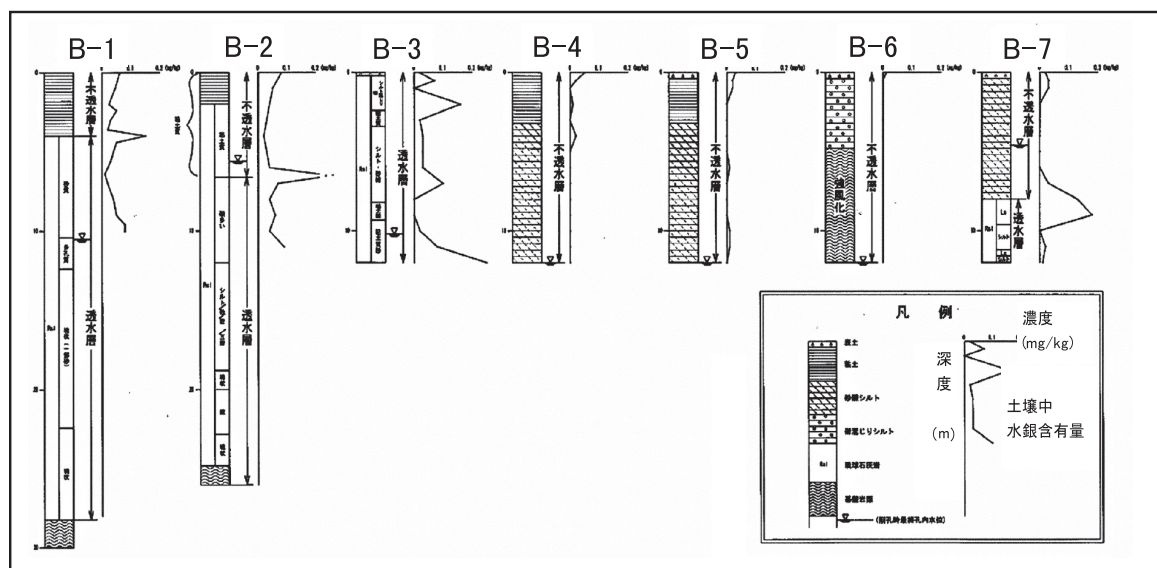


図6. 土壌中水銀含有量の垂直分布

点存在した。このことから、当地域において、地下深部からの水銀蒸気の上昇が示唆された。また土壌調査の結果、人為的に土壌が汚染された形跡は認められなかった。ボーリングコアの土壌水銀含有量が不透水層/透水層の境界付近で高いことは地下深部からの水銀蒸気の上昇による自然汚染で説明され、人為的汚染では説明が難しい。既存の資料等を含めて検討した結果、当地域における地下水水銀汚染は人為的汚染である可能性は少なく、断層等地盤の割れ目に沿って地下深部から上昇してきた水銀蒸気が井戸水中に溶解したことによる、自然由来の汚染であると考えられる。

V 参考文献

- 1) 沖縄県(2004):平成15年度石川市嘉手苅地区地下水汚染原因究明調査報告書
- 2) 沖縄県(2004)：平成15年度石川市嘉手苅地区ボーリングによる水銀蒸気測定業務報告書
- 3) 吉田直史・普天間朝好・宮城俊彦他(2005)：石川市嘉手苅地区地下水水銀汚染について、沖縄県衛生環境研究所報, 39, 55-61
- 4) 中牟田啓子・木下誠・松原英隆他(1998)：金属水銀による地下水汚染機構の解明, 水環境学会誌, 21, 875-878
- 5) 野田徹郎(1982)：金線による気体水銀の補足とその地熱探査への応用, 日本地熱学会誌, 3, 149-163
- 6) 古賀昭人(1985)：水銀測定を利用した地熱源の探査, 化学と工業, 38, 358-360
- 7) 沖縄県(2005):平成16年度沖縄市地下水水銀汚染原因究明調査業務報告書
- 8) 沖縄県(2006):平成17年度沖縄市地下水水銀汚染原因究明調査報告書
- 9) 沖縄県(2004):平成15年度土壌汚染状況等調査報告書
- 10) 土壌環境分析法：土壌環境分析法編集委員会編, 博友社
- 11) 環境庁水質保全局：土壌・地下水中汚染に係る調査・対策指針運用基準（平成11年1月）
- 12) 沖縄県企業局：平成元年度旧19号井戸汚染拡散防止及び回復対策に関する調査報告書

