

大阪府泉南地区の活断層近傍に出現する地下水中水銀の起源とテクトニクスとの関係

Relationship between occurrence of mercury in groundwater and active faults in Sennan area, Osaka Prefecture

*坂本 裕介¹、益田 晴恵¹、武内 章記²、村崎 友亮¹、新谷 毅¹、平井 望生¹、後藤 葵¹、近岡 史絵¹
*Yusuke Sakamoto¹, Harue Masuda¹, Akinori Takeuchi², Yusuke Murasaki¹, Tsuyoshi Shintani¹,
Nozomu Hirai¹, Goto Aoi¹, Fumie Chikaoka¹

1. 大阪市立大学理学研究科生物地球系専攻、2. 国立研究開発法人国立環境研究所

1. Department of Geosciences, Faculty of Science, Osaka City University, 2. National Institute for Environmental studies

大阪府域では水質汚濁防止法に基づいて4513点で行われた地下水質調査により、総水銀検出井戸が31地点で検出されている(大阪府, 2009)。また、水銀検出井戸の多くは北河内地区と泉南地区にある。北河内地区では生駒断層系の活断層に沿って上昇していると考えられた(大阪府, 2009)。北河内地区のうち、枚方地区で採水した2地点の地下水について $\delta^{202}\text{Hg}$ が-0.65~-0.85%の値を得ている。水銀の大部分が無機水銀であることと合わせて、これらの水銀の起源は地質由来であると推定された(坂本ほか, 2016)。本研究では、泉南地区の水銀が北河内地区と共通の由来を持つ可能性があると考え、水銀検出地点と活断層の地理的關係を明らかにし、水銀の起源を明確にすることを目的として、地下水の分析を行った。

水銀検出井戸が報告されている大阪府岸和田市・和泉市を対象として、2016年8月~12月に27地点で地下水を採取し、主成分と水銀濃度を分析した。地下水はすべて民家の丸井戸またはチューブ井戸で、井戸深度は10m以下、水位は1~2m程度であった。

調査地の泉南地区は大阪府南部に位置している。この地域は更新統の堆積岩からなる広い台地を中心として、大阪湾岸の沖積低地と南に領家花崗岩類からなる和泉山地を含んでいる。大阪湾の海岸線に沿って沖積低地と段丘層の境に泉南断層、大阪平野の中央部を南北に順次する上町断層、和泉山脈の領家花崗岩類と更新世の台地を南北に境する内畑断層が存在しており、これらの断層に斜行する小さな断層群がある。また、更新世の地層中の断層は大規模な撓曲帯や破砕帯を伴うものが多い。今回調査した泉南地区の地下水では環境基準値(0.5ppb)を超えた水銀は検出されなかったが、14地点の井戸から数十ppt以上の水銀が検出され、最も高いもので201pptの値を得た。またその地点は上町断層系の断層近傍であった。水銀が検出された地点は上町断層帯付近に集中しており、巨視的には上町断層帯をに沿った直線状の分布をとった。また、湾岸の泉南断層に沿っても水銀検出地点がある。

地下水の主成分化学組成は $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ 型と $\text{Na-Cl-}(\text{SO}_4+\text{NO}_3)$ 型に大別された。水銀濃度が比較的高い試料の主成分化学組成は硝酸イオン・硫酸イオンが高い傾向が見られた。これは、北河内地区の水銀検出井戸の地下水の主成分組成と異なる性質である。北河内地区では、硫酸・硝酸・塩化物イオンなどの人為由来成分の多い地下水は、 Ca-HCO_3^- 型の流動性の高い地下水よりも水銀濃度が低い傾向が顕著であった。硝酸イオンは水銀ガスを酸化させ、イオン化して溶存させる役割をしているのかもしれない。水銀は温度変化によって急速に蒸発・気化する元素であり、好気的水環境では陽イオンとして溶存する。このような水銀の性質を考慮すると、調査地域の水銀は、断層に沿って地下深部から上昇した後に、好気的な浅層地下水に捕獲されたと考えられる。

浅部では間隙水放出や続成作用により、深部では変成作用によって脱水が起こっている日本列島では、沈み込みに伴ってスラブからの流体の放出があることが知られている。そのような場所では、しばしば高濃度塩水と低周波地震の震源が重なることが報告されている(風早, 2014)。大阪府域で地質由来と推定される水銀の検出地点である北河内地区と泉南地区には低周波地震の震源が報告されている(高橋・宮村, 2009)。このことは、水銀が低周波地震活動に関連して地下深部から上昇していることを示唆する。本調査地域には上町断層帯に分類される活断層とそれとの共役断層が多く存在している。また、調査地域内の大阪層群(更新世堆積

層)には大規模な撓曲帯が存在している。これらのことから、スラブ流体の脱水に伴って放出された水銀が活断層を上昇経路として地表に到達したと私たちは考えている。

今後、地下水と土壌ガスの水銀同位体比を分析することで、水銀の起源とテクトニクスとの関連を明らかにしたい。

キーワード：水銀、地下水、同位体

Keywords: mercury, groundwater, isotope

鹿塩地域に湧出する塩水を用いた深部および浅部端成分の地球化学的探索 Geochemical analysis of shallow and deep end members by use of brine discharging at Kashio area, Nagano prefecture, central Japan

*楠原文武、田中秀実¹、風早康平²、森川徳敏²、安原正也³、高橋正明²、戸崎裕貴²

*Fumitake Kusuhara, Hidemi Tanaka¹, Kohei Kazahaya², Noritoshi Morikawa², Masaya Yasuhara³, Masaaki Takahashi², Yuki Tosaki²

1. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻、2. 産業総合技術研究所 活断層・火山研究部門、3. 立正大学地球環境科学部

1. Department of Earth and Planetary Environmental Science, The University of Tokyo, 2. Geological Survey of Japan, AIST, 3. Rissho Univ.

日本に湧出する温泉は主にその水の酸素・水素同位体比から、グリーンタフ型・海岸温泉型・火山性型・有馬型の4つに分類されている。このうち有馬型の温泉水は地下深部の塩水と天水との混合で形成されていると考えられているが、深部塩水そのものの組成ははっきり分かっておらず、深部塩水の起源についてもマグマ水説・スラブ水説という2つの仮説が対立している。深部塩水の組成を明らかにし有馬型温泉の起源に迫ることは、温泉学における重要な目標である。本研究では、有馬型温泉の一つに分類されている、長野県南部の中央構造線近傍に湧出する鹿塩（かしお）温泉において温泉水の採取を行い、水の酸素水素同位体比・Cl濃度・HCO₃濃度・³H濃度・溶存希ガスの濃度と同位体比の値の季節変動を利用して、混合系の解析と深部塩水の端成分を推定することを試みた。分析の結果、鹿塩温泉は深部塩水と天水起源の若い地下水との2成分混合で説明できることが分かり、トリチウム濃度を利用することで、深部塩水の端成分として $\delta^{18}\text{O}$: -1‰, δD : -49‰, Cl: 25000 mg/Lという推定値が得られた。深部塩水の同位体組成はマグマ水では説明することができず、沈み込んだスラブから脱水・上昇した水が地殻内で鉱物と同位体交換を起こした結果として解釈される。また深部塩水のCl濃度推定値と河川調査の結果から、鹿塩における深部塩水のフラックスは0.63L/secと見積られる。この値は有馬温泉や神戸地域での値とそれほど変わらない結果となった。

地下水ラドン濃度による立川断層の位置の探索

Exploration of Tachikawa Fault by Groundwater Radon Concentration

*角森 史昭¹、下館 知也¹

*Fumiaki Tsunomori¹, Tomoya Shimodate¹

1. 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設

1. Geochemical Research Center, Graduate School of Science, University of Tokyo

地下水のラドン濃度を用いて立川断層を調査した。断層周辺の浅い地下水試料中のラドン濃度は、関東平野の地質学から予想されるものと同等であり、以前の研究と一致していた。岩盤深度の帯水層からの深部地下水中のラドン濃度は、浅い地下水とほぼ同等であった。しかし、断層に近い井戸で得られた地下水試料のラドン濃度は、予想されるラドン濃度よりも著しく高かった。この不一致は、断層の両側に広がる破碎帯の存在によって説明できる。深部地下水試料のラドン濃度分布は、従来の立川断層の南端にも断層が存在することを示唆している。

キーワード：ラドン、地下水、立川断層

Keywords: Radon, Groundwater, Tachikawa fault

山陰ひずみ集中帯におけるヘリウム同位体比 Helium isotope anomalies in the San-in shear zone

*梅田 浩司¹、浅森 浩一²、雑賀 敦²、西村 卓也³

*Koji Umeda¹, Koichi Asamori², Atsushi Saiga², Takuya NISHIMURA³

1. 弘前大学大学院理工学研究科、2. 日本原子力研究開発機構、3. 京都大学防災研究所

1. Hirosaki University, 2. Japan Atomic Energy Agency, 3. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

山陰地方においては、最近発生した2016年鳥取県中部地震をはじめ、1943年鳥取地震(M7.2)や2000年鳥取県西部地震(M7.3)などの地殻浅部を震源とする大地震が数多く発生している。また微小地震分布では海岸線にほぼ平行な帯状の地震活動域が認められ、その領域は北中国剪断帯(Northern Chugoku Shear Zone: NCSZ)と呼ばれている(Gutscher and Lallemand, 1999)。一方、国土地理院のGEONETによって明らかになった日本列島の地殻変動分布では、山陰地方を含む中国地方は、ひずみ速度の小さい領域として認識されてきたが(例えば, Sagiya et al., 2000)、最近のGEONETデータの解析から、山陰地方の東部において、海岸線に平行な地震帯に沿ってひずみ集中帯の存在(山陰ひずみ集中帯)が明らかになった(西村, 2014)。このひずみ集中帯では、幅10 km程度で3 mm/年の右横ずれ運動を示唆する変形が見られており、地震のメカニズム解でも右横ずれ運動と調和的な応力場となっている。このひずみ集中帯の変動は、鉛直右横ずれ断層の深部で年間4~5 mm程度のすべりが生じることで説明できる。また、この鉛直右横ずれ断層の動きは1943年鳥取地震の断層運動とも調和的である。内陸地震の発生の原因として、従来から下部地殻における変形は延性せん断帯と呼ばれており(Sibson, 1977)、断層直下の下部地殻の強度が局所的に小さいことで、その領域に変形が集中し、直上の断層に応力集中することが指摘されている(例えば、飯尾, 1996)。また、下部地殻の強度の低下には、地殻流体の存在が大きな役割を果たしていると考えられている(例えば、Iio et al., 2002)。今回、山陰ひずみ集中帯にスラブ起源流体が寄与している可能性を検討するため、西南日本の(温泉ガス、地下水溶存ガス等に含まれる)ヘリウム同位体比($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比)のデータのコンパイルを行った。ヘリウム同位体比と内陸地震の震源や深部低周波イベントの分布とは良い相関が認められる。また、山陰ひずみ集中帯では、高いヘリウム同位体比を示すことから、この地域にはマントルから下部地殻への流体の上昇が示唆される。

最近、内陸部や日本海側も含めた西南日本のひずみ集中帯の原因を説明するため、GNSSデータに基づくひずみ分布、微小地震分布、活断層の位置を考慮したブロック断層モデルが提案されている(Nishimura et al., 2015)。それぞれのブロックは剛体として振舞うため、ブロックの境界付近ではひずみ速度が大きく、地震が多く発生する地域が生じる。ブロック境界およびその内部のヘリウム同位体比の特徴をみると、活火山の周辺を除きブロックの内部に比べて境界では高い同位体比を示す。そのため、これらのブロック断層の存在は、下部地殻から地殻浅所への効率的なマントルヘリウムの移動に寄与しているのかもしれない。

キーワード：ヘリウム同位体、山陰ひずみ集中帯

Keywords: helium isotope, San-in shear zone

2014年長野県北部地震（Mj 6.7）の震源域における比抵抗構造の推定 Crustal resistivity structure beneath the source region of 2014 northern Nagano earthquake

*浅森 浩一¹、濱 友紀¹、梅田 浩司²、田中 秀実³

*Koichi Asamori¹, Yuki Hama¹, Koji Umeda², Hidemi Tanaka³

1. 日本原子力研究開発機構、2. 弘前大学大学院理工学研究科、3. 東京大学大学院理学系研究科

1. Japan Atomic Energy Agency, 2. Hirosaki Univ., 3. Univ. of Tokyo

1. はじめに

沈み込み帯に位置する日本列島においては、火山に供給するマグマやそれに関連する流体の存在が、主に地球物理学的な手法によって見出されてきた。これらの流体は、単に火山や温泉の形成のみならず、日本列島の地震活動や地殻変動にも重要な役割を果たしていると考えられており、マントルウェッジから上昇してきた流体が下部地殻の強度を低下させ、その上の地殻に応力が集中して破壊（地震）が生じる可能性が指摘されている（例えば、Iio et al., 2002）。また、さらに長期的には、このような地殻変動が隆起山地の形成にも関与しているとも考えられている。

2014年11月22日に長野県北部の白馬村を震源として発生した長野県北部地震（Mj 6.7）の震源域では、これに伴った地表地震断層が、糸魚川-静岡構造線活断層系の北端部に位置する神城断層沿いに認められている（例えば、杉戸ほか, 2015）。本研究では、この神城断層を含む領域にMT（Magnetotelluric）法による電磁探査を適用することで、地殻の二次元比抵抗構造を推定し、震源域下における流体の存在や分布について検討した。

2. MT法電磁探査

本研究では、長野県白馬村から長野市皆神山に至る約45kmの区間においてファーリモートリファレンス方式のMT法探査を行なった。ここでは、神城断層におよそ直交する北西-南東方向の測線上に、2-10 km程度の間隔で17点の観測点を配置した。測定には、Phoenix社製MTU-5システムを使用し、磁場3成分、電場2成分の時系列を測定した。対象地域のノイズ環境を考慮して、測定時間は夜間を含む15時間とし、各観測点で2日間以上の測定を行うとともに、リモートリファレンス点を岩手県沢内村（調査地域からの距離約400km）に設けた。リファレンス処理の結果、各観測点においてノイズ除去の効果が認められ、周波数320Hz-0.0003Hzの信頼性の高いインピーダンスを得ることができた。解析にあたっては、Ogawa and Uchida(1996)のアルゴリズムを用いた2次元インバージョンを行い、見掛比抵抗・位相の観測データから、震源域を含む領域における深さ20kmまでの二次元比抵抗構造を推定した。

3. 結果

解析により推定された比抵抗構造から、長野県北部地震の震源域下における以下の特徴が明らかになった。

(1)震源域下の深さ約3km以深に顕著な低比抵抗体が認められ、本震の震源はその端部に位置する。

(2)この低比抵抗体は南東方向に傾斜し、下部地殻まで連続するようにイメージされる。

(3)以上の結果は、震源域に地殻深部を起源とする流体が存在し、内陸地震の発生に関与した可能性を示唆する。

参考文献

lio, Y. et al. (2002) Water-weakened lower crust and its role in the concentrated deformation in the Japanese Islands, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 203, 245–253.

Ogawa, Y., Uchida, T. (1996) A two-dimensional magnetotelluric inversion assuming Gaussian static shift, *Geophys. J. Int.*, 126, 69–76.

杉戸信彦ほか (2015) 白馬村北城新田および大出における神城断層の平均変位速度と活動時期の検討, *活断層研究*, 43, 109-118.

キーワード：2014年長野県北部地震、比抵抗構造、流体

Keywords: 2014 northern Nagano earthquake, resistivity structure, crustal fluids

地下坑道の2段階の再冠水に伴うP波速度およびS波速度の変化 Changes in P and S wave velocity associated with the two-staged reflood of the underground galleries

*國友 孝洋^{1,2}、山岡 耕春¹、渡辺 俊樹¹、浅井 康広²、石井 紘²

*Takahiro Kunitomo^{1,2}, Koshun Yamaoka¹, Toshiki Watanabe¹, Yasuhiro Asai², Hiroshi Ishii²

1. 名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター、2. 公益財団法人 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

1. Nagoya Univ., 2. Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction

東濃鉱山の地下坑道の閉鎖措置に伴い、周辺岩盤の地震波速度変化がS波のみならずP波でも検出され、2段階の再冠水イベントを捉えていたことが明らかになったので報告する。

弾性波アクロス土岐送信所（名古屋大学）が設置されている東濃鉱山（日本原子力研究開発機構、岐阜県土岐市）では、2012年3月から地下坑道（本延坑道はGL-125m、標高160m）の充填作業が開始され、2014年12月9日に主要排水ポンプ（本延坑道）を停止、2015年3月には坑道の閉鎖が完了した。主要排水ポンプ停止後、充填坑道内では再冠水が始まり、弾性波アクロス信号の観測により、直下のボアホール加速度計（98SE-01号孔、GL-203m、名古屋大学）で直接S波の顕著な走時変化が検出された。國友・他（2016）JpGUでは、主要排水ポンプ停止後、充填坑道内では地下水位が上昇し、ほぼ同期する形でBH-1号孔（本延坑道から約40m下）での歪変化（短縮）が観測されたこと、また、それらとほぼ連動する形で、98SE-01号孔でS波走時が約4ms低下するのが観測されたことを報告した。そして、S波速度変化が、送信所直下の瑞浪層群内ではなく、その基盤岩である土岐花崗岩内で生じたこと、埋設坑道内の間隙水圧の上昇により花崗岩内のクラックが開口しS波速度が低下したことを明らかにした。現在稼働している弾性波アクロス送信装置は、水平方向に加振するため、直下にはS波のみを放射するが、水平～斜め下方にはP波も放射している。そこで、TRIESのボアホール観測網のデータなどを用いて遠方から鉱山付近のP波速度変化についても調べた。その結果、主要排水ポンプを停止した2014年末よりも前に、P波速度が増加するイベントが発生していたことが判明した。

アクロス信号の解析には、①98SE-01号孔、②TRIESのボアホール観測網のうち記録計のサンプリングクロックに問題がなかった観測点、および、③Hi-net八百津（N.YOTH）を用いた。解析には、2012年4月1日から2016年7月1日までのデータを用いた。2時間毎の6成分グリーン関数を計算した後、クロススペクトル法によりP波およびS波（SH波およびSV波）の走時変化を計算した。クロススペクトルを計算するための基準グリーン関数には、2012年4月の一か月間スタッキングデータを用いた。

解析の結果、全ての観測点（最大11.3km）で鉱山近傍でのS波およびP波の走時変化が検出された。S波の走時遅延の大きさは、観測点の方位やS波の振動方向によって異なっており、主要排水ポンプ停止後の再冠水による坑道周辺へのS波速度変化の影響範囲およびクラックの配向を反映しているものと考えられる。P波も、2014年末頃から全ての観測点で走時の遅延が観測されている。北方（HYS、N.YOTH）および南方（TOS）の観測点では、2014年の中頃から走時が徐々に早まり、遅延に移行する直前には、0.5～1ms程度早くなる現象が確認された。他の観測点ではこの現象は見られない。BH-1の歪計にもこの変化は現れていない。東濃鉱山では、2014年3月までに本延坑道の東端から北に延びる北延坑道（上盤・下盤）の充填が終了し、充填後の北延下盤坑道からもポンプにより坑道内の水を排水していた。しかし、同年6月頃に下盤ポンプが故障し、坑道での地下水位が下盤レベル（標高152m）から上盤レベル（標高160m）まで上昇した。主要排水ポンプが稼働していることから、その後の水位は上盤（本延）レベルに保たれている。この水位上昇により周辺の土岐花崗岩中の地下水位も上昇し、土岐花崗岩の含水率の高まった部分でP波速度が増大し、観測点の方位によってはP波の走時が早くなったものと考えられる。また、クラックが開口するとP波速度も遅くなるため、2014年度の後半での地下水位の上昇は、新たなクラックを開口させるほどには間隙水圧を上昇させなかったと考えられる。

（謝辞）本研究には、防災科学技術研究所のHi-netのデータを使用させて頂きました。また、東濃地科学センターからは鉱山坑道内の充填後の地下水位のデータを頂きました。合わせて感謝いたします。

キーワード：弾性波アクロス、地震波速度変化、地下水

Keywords: seismic ACROSS, seismic velocity change, groundwater