

内陸地震震源域下の流体の分布と起源

Evidence suggesting crustal fluids beneath earthquake source regions

*梅田 浩司¹*Koji Umeda¹

1. 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター

1. Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency

内陸地震の震源域下の中～下部地殻には、比抵抗構造の顕著な不均質性が認められる。鳥取県西部地震や鹿児島北西部地震のように横ずれ型の震源断層は、高比抵抗体と低比抵抗体の境界ではなく、やや高比抵抗体側に集中する傾向が認められる。地殻を構成する岩石の比抵抗値は、岩石が含む流体の量およびその連結度によって著しく低くなるため、地殻内の低比抵抗体はメルトや流体の存在を示唆する。そのため、低比抵抗体の周辺で発生している内陸地震は、地殻内の流体相の存在に起因する局所的な弱化による非弾性的な変形が、震源断層に対して応力集中に参与しているのかもしれない (e.g., Hasegawa et al., 2005)。一方、福島県浜通りで発生しているような群発地震は、下部地殻の流体の上部地殻への侵入によって、断層の強度が低下することによって生じている可能性がある (Noir et al., 1997)。地下水中のヘリウム同位体比は、マントル成分や地殻成分の寄与の違いを反映している。そのため、それぞれの震源域の低比抵抗体に参与している流体もマグマ水のほか、スラブ起源流体や続成脱水流体、変成脱水流体等と様々なケースがある。

キーワード：ヘリウム同位体、比抵抗構造

Keywords: helium isotope, electrical resistivity structure

滋賀県湖西地域の地下水と地殻変動・降雨との関係

Relation among crustal deformation, precipitation and groundwater in Kosei area of Shiga Prefecture

*小泉 尚嗣¹

*Naoji Koizumi¹

1. 滋賀県立大学環境科学部

1. School of Environmental Science, the University of Shiga Prefecture

琵琶湖に流入する水の2割程度が地下水と言われていて、その主要部分を湖西地域の地下水が占めると考えられている。湖西地域には山地が多く、その山地に降った降水が湖西地域の豊かな地下水を形成している。熊谷ら（2015）は、潜水ロボットによって、2008年12月に琵琶湖西部の最深部付近で湧水とガスの噴出口（ベント）を発見し、2010年12月時点で、ベントが認められる地域が拡大していることを見いだした。彼らは、ベントの拡大と地殻変動との関係を示唆している。実際、琵琶湖付近は、新潟-神戸歪集中帯に属し、年間で10のマイナス7乗程度の大きな縮みが、少なくとも最近数十年は続いてきている。しかし、その比率が2010年頃に変化したという報告はない。国土地理院の提供する電子基準点の日々の座標値のデータを用いて、琵琶湖を東西に挟む基線である彦根-高島間の距離が、1996年以降、上述の比率でほぼ一定に縮んでいることが確認できた。他方、琵琶湖周辺の平均的な降水量が、2010年以降増加していることを見いだされた。また、湖西の山間部にある産業技術総合研究所の花折地下水観測点でも、2010年以降に地下水圧が増加している。したがって、2010年頃に琵琶湖周辺の降水量が増加した結果、湖西地域山地内での地下水圧が上昇して琵琶湖への地下水流入量が増加した可能性がある。もし、それが正しければ、増加した地下水はベントが認められる地域を拡大させ得るだろう。発表においては、琵琶湖周辺における降水・地下水圧・地殻変動の相互関係について述べる予定である。

参考文献

熊谷道夫・浜端悦治・奥田昇, 2015, 琵琶湖は呼吸する, 海鳴社. 180pp.

キーワード: 琵琶湖、地殻変動、降水、地下水、新潟神戸歪集中帯

Keywords: Lake Biwa, crustal deformation, precipitation, groundwater, Niigata-Kobe Tectonic Zone

本宮観測点における水理特性・水質・ガス分析

Hydraulic properties, water chemistry and gas composition at Hongu observatory, Wakayama Prefecture

*松本 則夫¹、佐藤 努¹、宮越 昭暢¹、森川 徳敏¹、高橋 正明¹、塚本 斉¹、風早 康平¹

*Norio Matsumoto¹, Tsutomu Sato¹, Akinobu Miyakoshi¹, Noritoshi Morikawa¹, Masaaki Takahashi¹, Hitoshi Tsukamoto¹, Kohei Kazahaya¹

1.産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門

1.Institute of Earthquake and Volcano Geology, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

現在開発中の³He/⁴Heガスの野外連続観測質量分析装置（角森・田中，私信）を設置する候補地点を調査するために、本宮観測点の1000m井戸の温度・電気伝導度検層と揚水試験を実施した。揚水試験後に採水、ガスのサンプリングを実施した。本宮観測点について同装置を設置する候補として選んだ理由は次の通りである：(1)本宮観測点の付近の温泉で高い³He/⁴He比が観測されている：(2)本宮地域では過去の東南海・南海地震と関係する温泉の湧出の停止が古文書に記載されている(3)本宮観測点付近で本宮地域直下のプレート境界で発生する非火山性深部低周波微動・深部すべりを検出するために地下水・地殻ひずみ・地震の観測を続けている。調査の結果、当観測井戸の帯水層の透水量係数は中庸で、採取したガスの³He/⁴He比は同様に高く、水質は周辺の温泉に類似していることがわかった。

キーワード：水理特性、水質、ガス、深井戸

Keywords: hydraulic property, water chemistry, gas composition, deep well

跡津川観測井で記録されたガス組成の時間変化について

Time series of gas composition in groundwater monitored at Atotsugawa Well

*角森 史昭¹、田中 秀実²*Fumiaki Tsunomori¹, Hidemi Tanaka²

1. 東京大学大学院理学系研究科地殻化学実験施設、2. 東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻

1. Geochemical Research Center, Graduate School of Science, University of Tokyo, 2. Department of Earth and Planetary Science, Graduate School of Science, University of Tokyo

2010年10月から2013年2月までの間に、跡津川観測井で記録された地下水溶存ガスの組成の時間変化について議論を行う。跡津川観測井は、地球化学観測専用の地下水井として掘削された。ストレーナ深度は跡津川断層の下盤側に設置された。平均的な水頭位置は、管頭より-5mである。地下水は、1L/min程度の速度で、帯水層から直接揚水された。揚水に伴う減圧により、溶存ガスは揚水用テフロンパイプ中で発泡する。この発泡ガスを溶存ガスと見なし、地上に設置した四重極質量分析計で溶存ガスを分析した。溶存ガスの組成は1時間毎に現地でも分析した。ガス組成のうち酸素の成分は大気由来であると考え、標準大気の組成をもちいて、記録された溶存ガス組成から大気の混入成分を差し引いた。この補正データをもちいて、N₂-He-Arの三角プロットを行うと、溶存ガスの組成は、大気と地殻の混合線上に分布し、わずかではあるが、大気とマンツルの混合線場にも分布した。この方法は、地下水溶存ガスの組成が、地殻・大気・マンツルの三つの端成分の混合の時間変化を表現するのに有効であると考えられる。

キーワード：地下水、溶存ガス、時間変化

Keywords: Groundwater, Dissolved gas, Time variation

別府温泉における温泉井中のヘリウム濃度の深度分布

Depth profile of helium concentration in a hot-spring well in Beppu, Japan

*柴田 智郎¹、高畑 直人²、佐野 有司²*Tomo Shibata¹, Naoto Takahata², Yuji Sano²

1.京都大学大学院理学研究科、2.東京大学大気海洋研究所

1.Graduate School of Sciences, Kyoto University, 2.Atmosphere and Ocean Research Institute, University of Tokyo

地下深部の状態を把握するためには、深部からしみ出してくる揮発性物質を理解することが重要である。なかでもヘリウムフラックスは有望な指標の1つである。ヘリウムは岩石との相互作用に乏しいため、地殻内では流体とともに移動する。また、ヘリウムには2つの同位体があり、その同位体比を調べることで、マントル起源とする流体の寄与や地下水の滞留時間などを推測することができる。そこで、大分県別府温泉にある温泉井にて、気体半透膜を使った受動拡散サンプラーを用いて温泉水中に溶存しているヘリウムの採気を試み、ヘリウム濃度の深度分布を求めた。

別府温泉は、九州中部の張力が発達する地域（松本，1979）の東端に位置する。温泉活動は、西側の鶴見火山群から東側の別府湾岸まで続き、火山群から供給される熱水流体がもたらしている。この地域は、西側の火山群から流出してきた安山岩類の砕屑物によって埋められた扇状地であり、その南縁と北縁はそれぞれ東西方向に走る断層によって挟まれている。西側の火山群から供給された熱水流体は、これら2つの断層に沿って、東側の海岸方向に流動している（Allis & Yusa, 1989）。

深度300mの温泉井に、2015年7月13日～16日と8月21日～24日との異なる2期間にて、井戸内の深度約290mから約50m間隔ごと上方に向かってサンプラーを設置し、ヘリウムを採気した。採気したヘリウムは、東京大学大気海洋研究所にある希ガス同位体質量分析計（Helix-SFT; GV Instrument）を用い、その濃度と同位体比を求めた。

ヘリウム濃度と同位体比（³He/⁴He）は、設置深度が浅くなるに従い、それぞれ低くなる。同位体比が最も高い試料は井戸底付近のもので、それぞれ7.08Raと6.79Ra（Ra=1.4E-6）を示した。これらの高い同位体比はマントル起源のヘリウムの寄与が示唆される。温泉井は、スクリーンが井戸底付近の278m～300mにあり、温泉水はスクリーンを通じて流出入する。温泉水とともに井戸内に入ったヘリウムは、上方に拡散することにより、濃度が上方に向かって低くなるような鉛直分布したと考えられる。

参考文献

Allis R.G. and Yusa Y. (1989) Fluid flow processes in the Beppu geothermal system, Japan. *Geothermics*, 18, 743-759.

松本夫 (1979) 九州における火山活動と陥没構造に関する諸問題. *地質学論集*, 16, 127-139.

キーワード：ヘリウム、同位体比、温泉、鉛直濃度分布

Keywords: helium, isotope ratios, hot spring, depth profile of concentration

重力変化を説明できるTRIES・MIU周辺の地下水流動モデル-その2

Water flux model around TRIES/MIU to explain the gravity change - II

*本多 亮¹、柳澤 孝一²、大久保 慎人³、田中 俊行¹

*Ryo Honda¹, Koichi Yanagizawa², Makoto OKUBO³, Toshiyuki Tanaka¹

1.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、2.国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、3.高知大学教育研究部自然科学系理学部門

1.Tono Research Institute of Earthquake Science, Association for the Development of Earthquake Prediction, 2.Japan Atomic Energy Agency, 3.Natural Science Cluster, Kochi University

東濃地震科学研究所 (TRIES) では2003年より継続的に研究所周辺3観測点での絶対重力測定を繰り返し行っており、2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う重力変化を捉えた。3観測点ともに観測された10 μ Gal程度の重力減少は地殻変動による影響を考慮しても大きく、同時に近傍で観測された14mに及ぶ水位上昇とは逆センスの変動であった。我々はこの重力変化を説明するための地下水流動モデルの構築を進めてきた。これまでに周辺地域の水理地質構造を考慮した重力変化シミュレーションを行い大枠での水の流動は表層から深層への移動であるらしいことを明らかにした。一方でTRIESに隣接する瑞浪深地層研究所 (MIU) でも周辺地域に幾つかの水位 (水圧) 観測井を所有しており、Niwa et al., (2012) では東北地方太平洋沖地震の際にそれらの井戸で観測された地震時水位変化について報告している。

本報告ではまずTRIES/MIU周辺で観測された重力データについて、新たに地震後5年間の地殻変動 (余効変動) の影響を考慮した。地震時の隆起は1 cm未満であり重力変化に影響しないことは既に確認されていた。余効変動はこの5年余りで4 cm程度の隆起を示しており、これによる重力効果は9 μ Gal程度の減少となる。地震時地下水応答はこの5年でほぼ回復傾向にあり、それにもかかわらず一見地震後のままの値を示し続ける重力値は余効変動によるものであると考えられる。また、地震時地下水応答についてNiwa et al. (2012) で報告されたものも含めてTRIES/MIU周辺の水位観測結果それぞれについて詳しく調べ、それぞれの井戸で観測された水位変化について変位量、変位ピークまでの時間、その後の回復の様子等について整理し傾向を調べた。特に水位回復と帯水層であると考えられる基盤面上の集水域面積との間に相関性が確認できた。また、複数のパッカーにより水圧観測をしている井戸で地震時に深層へ水が移動した様子が見られるかどうかも調べた。

キーワード：重力、地下水、地震応答

Keywords: Gravity, Ground Water, Coseismic Response

弾性波アクロスによるS波走時変化観測から推定される地下坑道閉鎖後の地下水とクラックの挙動
Groundwater and crack behaviors after underground gallery closure inferred from
observation of S-wave travel time change by the seismic ACROSS

*國友 孝洋^{1,2}、山岡 耕春¹、石井 紘²、浅井 康広²、渡辺 俊樹³

*Takahiro Kunitomo^{1,2}, Koshun Yamaoka¹, Hiroshi Ishii², Yasuhiro Asai², Toshiki Watanabe³

1.名古屋大学大学院環境学研究科、2.(公財)地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所、3.東京大学地震研究所

1.Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University, 2.Tono Research Institute of Earthquake Science, ADEP, 3.Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

<はじめに> 弾性波アクロス土岐送信所(岐阜県土岐市 東濃鉱山)では、2002年10月から13年間以上にわたる連続送信が継続されている。東濃鉱山(日本原子力研究開発機構)では、2012年3月から地下坑道(本延坑道はGL-125m)の充填作業が開始され、2014年12月9日に排水ポンプを停止、2015年3月には坑道の閉鎖が完了した。本研究では、弾性波アクロス信号の観測により得られた、地下坑道閉鎖後の再冠水に伴うS波の顕著な走時変化について報告する。さらに、S波速度変化は、堆積岩層(瑞浪層群、厚さ約90m)の下にある土岐花崗岩内で生じていると結論できること、また、充填坑道内およびその周辺の地下水流動により、花崗岩内のクラックの開閉およびS波速度変化がコントロールされていることを議論する。

<実験概要> アクロス信号の観測には、送信点のほぼ直下の観測点(98SE-01号孔。GL-203m)に設置されている加速度計で行った。本研究に用いた弾性波アクロスは水平加振で、直下ではP波が明瞭には観測されないため、専らS波について議論する。S波のパスは坑道を通過しないが、深度的には送受信点の間に坑道が存在する位置関係である。解析には、同一の記録計による観測データが存在する2009年1月20日から2015年9月までのデータを用いた。アクロス送信装置および送信信号、グリーン関数を計算するまでのデータ処理については、例えば、國友・他(2014)を参照のこと。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S波(SH波およびSV波)の走時変化を推定した。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、2009年3月から1年間のスタッキングデータを用いた。

<結果と議論> これまでの直接S波の走時変化は、SV波で ± 0.4 ms程度、SH波で ± 0.3 ms程度の年周変化が最も顕著であり、東北地方太平洋沖地震(M=9.0)の際にも $0.4\sim 0.5$ ms程度の走時遅延があっただけである。坑道の充填が開始された2012年以降も有意な変化は見られなかったが、2014年12月9日に排水ポンプ停止してから数週間後から顕著な走時遅延が始まった。約4か月後には4msに達する桁違いに大きな走時遅延となり、ほぼ安定な状態へと移行した。この走時遅延は、約2.4%のS波速度低下に相当する。

直接SH波の後には、瑞浪層群内での多重反射と考えられるフェーズが確認でき、特に地表と不整合面(瑞浪層群と土岐花崗岩)でそれぞれ2回および4回ずつ反射したと考えられるフェーズが明瞭である。それらは、反射回数にほぼ比例して年周変化および降雨による走時遅延が大きくなっている。一方、排水ポンプ停止後の走時遅延量は、直接波、2回および4回多重反射波でほとんど同じ大きさである。瑞浪層群内での通過距離が異なっても変化が同じであることから、地下坑道への再冠水が原因のS波速度変化は、土岐花崗岩内で生じていると結論できる。

ポンプ停止後、充填後の地下坑道内では地下水位が上昇し、それにほぼ同期する形での歪変化がBH-1号孔(本延坑道から約40m下)で観測されている。主歪はENE-WSW方向への短縮である。S波速度は、大きくみれば地下水位の上昇とともに低下しているが、降雨などの影響による地下水位の短期的な上昇・下降に着目すると、8~9日間程度遅れて低下・上昇の変化をしている。98SE-01号孔での記載によると、花崗岩内ではNE-SWおよびWNW-ESE走向(平均的には、NNW-SSE)の比較的低角のクラックが卓越している。再冠水によりこれらのクラックが開いたと考えれば、クラックの狭間にあるBH-1号孔の短縮方向が説明できる。また、坑道内の地下水位変化に伴う地下水流動が、S波のパス上のヘアクラックの開閉をコントロールしているとしたら、8~9日遅延してS波速度が変化するという現象を説明できそうである。地下坑道とパスの水平距離が25mであるので、地下水の(水平)移動速度は 3×10^{-5} m/s程度となる。

<謝辞> 弾性波アクロス土岐送信所の稼働には、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構の関係者の

方々の多大な協力を得ました。また、充填後の地下坑道の水位データを頂きました。合わせて感謝致します。
<参考文献> 國友孝洋・他, 2014, 地震, 67(1), 1-24.

キーワード：弾性波アクロス、東濃鉱山、再冠水、地震波速度変化

Keywords: seismic ACROSS, Tono mine, reflood, seismic velocity change