

九州前弧域における地震波速度構造及び比抵抗構造から推定される地殻流体 Crustal fluids beneath Kyushu forearc region

*浅森 浩一¹、濱 友紀¹、梅田 浩司¹

*Koichi Asamori¹, Yuki Hama¹, Koji Umeda¹

1. 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

1. はじめに

沈み込み帯に位置する日本列島の火山フロント及び背弧側においては、火山に供給するマグマやそれに関連する流体の存在が地球物理学的な手法によって見出されている。地殻やマントル・ウェッジにおける流体の分布は、主として地震波トモグラフィーや電磁探査 (Magnetotelluric; MT法) によって推定されているが (例えば, Zhao et al., 1992; Asamori et al., 2010), これらと地殻変動との関連性が指摘されている (飯尾, 2009)。また最近では、前弧域においても地殻流体の存在が指摘されており (例えば, Zhao et al., 2015; Umeda et al., 2015), 日本列島における地殻変動を議論する上では、地殻流体の分布を把握することが重要であると考えられる。本研究では、九州地方を対象として、MT法探査により2次元比抵抗構造を推定するとともに、地震波トモグラフィーによって3次元地震波速度構造の推定することで、とくに前弧域における地殻流体の有無や分布について検討した。

2. MT法電磁探査

宮崎県川南町から熊本県八代市に至る約105kmの区間と、宮崎県日南市から鹿児島県湧水町に至る約94km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。これらの二つの測線は、およそ火山フロントに直行し、2-10 kmの間隔で観測点40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1200km) 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、九州地方中部及び南部の前弧域-火山フロント-背弧域における地殻の2次元比抵抗構造を推定した。

3. 地震波トモグラフィー

本解析には、気象庁一元化カタログによる2003年6月から2012年2月までに日本列島下で発生した2503個の地震データを使用した。また、地殻のみならずマントルの構造も推定するため、Hi-netで記録された51個の遠地地震データも合わせて解析に用いた。解析では、研究領域内にgrid pointを水平方向に約33km、深さ方向に15-30kmの間隔で設置し、Zhao et al. (1994)のアルゴリズムを用いた3次元インバージョンを行うことで、地殻及び上部マントルにおける3次元P波及びS波速度構造を推定した (Asamori and Zhao, 2015)。

4. 結果

本解析により、九州地方の前弧域において、以下に述べる特徴が明らかになった。

- (1)九州地方中部の前弧域において、水平方向に約30kmの拡がりを持つ低比抵抗体が認められ、地殻中部からモホ面付近まで連続しているようにイメージされた。一方で、九州南部の前弧域には、顕著な低比抵抗体は認められない。
- (2)九州地方中部-北部の前弧域において、低比抵抗体に対応すると考えられる低P波、低S波速度異常体が認められた。ただし、火山下に認められる低速度異常体とは異なり、上部マントル深部まで連続する傾向は認められない。
- (3)以上の結果は、九州地方の火山に供給する流体とは異なる起源の流体が、前弧域の地殻に存在することを示唆する。

Possible fluid-related earthquakes from seismic spectra analysis: detection and mechanism

*Kuo-Fong Ma¹, Hidemi Tanaka²

1.Institute of Geophysics, National Central University, Taiwan, ROC, 2.School of Science, University of Tokyo, Japan

Fluid had been considered as a possible factor in triggering earthquakes, but, the evidence in elucidating the behavior and mechanism is still unresolved. Fracture zone associated with fault zone after an earthquake could be considered as a fluid reservoir, which possibly yields to some observations/detections of phenomena associated with pre-, co- or post-seismic of a larger earthquake. The fluid might behave from high pore-fluid saturation within fractured fault zone from fully to partial saturation as a transient feature after a large earthquake. We suspect this process might yield the migration of fluid flow, and thus, related to the occurrence of some aftershocks. Considering that the fluid flow triggering events might have a mechanism from tensile cracks rather than tensile shear, the S/P spectra ratio would be around 2-0.7 rather than higher values of 6-2 for tensile shear. We investigate the spectra ratio of the selected events from the analysis of the recorded broadband waveforms, we found significant association of the S/P spectra ratio of 2-0.7 in about 10-60 days after the Chi-Chi earthquake. It might give the evidence of the tensile crack events in association to the fluid flow and give the migration of the seismicity. These events are mostly in the negative Coulomb stress regime of the mainshock and are in the depth f about 5-8km. Our assumption on this is that the migration of fluid flow increases the pore-pressure, which reduces the normal stress, and, thus, yield the co-seismic negative Coulomb's stress regime to become positive to trigger these fluid flow associated aftershocks. The migration of this aftershock to the distance of the fault is with a speed of about 220m/day for our Chi-Chi case study in about 10-60 days after the Chi-Chi earthquake. More profiles along the fault will be further examined to assure our understanding on fluid migration within the crust. Moreover, if the zone of the fluid triggered events could be constrained spatially and temporally, we might be able to estimate the possible amount of fluid involved during this process.

Keywords: aftershocks, fluid flow, S/P spectra ratio

地下坑道再冠水に伴って観測された顕著な歪／地下水位変化

Remarkable crustal strain and Groundwater level changes associated with reflood of the underground gallery

*浅井 康広¹、石井 紘¹*Yasuhiro Asai¹, Hiroshi Ishii¹

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

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

[はじめに] 東濃地震科学研究所では、岐阜県瑞浪市と土岐市に9箇所のボアホール観測点を整備し地下水流動と地殻活動の関連性に関する研究を行っている。東濃鉱山（日本原子力研究開発機構）内にBH-1観測点がある（坑道からの深さ50mのボアホール；坑道の深度はGL-125m）。ボアホール孔底の土岐花崗岩内に地殻活動総合観測装置（石井式ボアホール歪計3成分、傾斜計2成分、温度計）が埋設・設置されている。東濃鉱山では閉山措置が進められており、2012年3月に地下坑道の充填作業（埋め戻し）開始、2014年12月9日に東濃鉱山坑道内に設置されていた排水ポンプの停止。この時点から坑道内の冠水が始まった。坑道の充填作業は2015年3月に坑道の閉鎖が完了している。本報告ではこの冠水に伴って観測されたBH-1およびその近傍の観測点（97FT-01, SN-1, SN-3）での顕著な地下水位および歪変化の紹介を行う。次に観測記録とJAEAによる作業記録の対比を行い、最後に歪解析結果およびその考察を述べる。

[観測] 排水ポンプ停止の時点ではBH-1の歪計各成分に大きな変化は見られなかった。12月27日18時50分頃からBH-1歪計各成分に急激な歪の縮みが始まり、急激な変化が終息の傾向になった2015年4月末までにBH-1 N347Eが約 5×10^{-6} 、BH-1 N107Eが約 3.6×10^{-5} 、BH-1 N107Eが約 4.9×10^{-5} の縮み変化が観測された。旧調査立坑には充填作業時に坑口（GL）から深度100mまで塩ビ管が設置され手測りによる1日1回の水位観測が行われている。2015年1月12日に水位観測が可能になった時点での水頭はGL-98.4m、5月21日現在約GL-35.7mに水頭が位置している。（1月12日からの水位上昇約62.7m）。BH-1の各歪計の縮み変化はこの水位上昇に応答していることは記録の比較から明らかである。同様に12月27日18時頃から東濃鉱山の北約400mに位置する賤洞地殻活動観測点SN-1およびSN-3の水位記録が急激な変化を始め、5月21日現在約3.5mの水位上昇が観測されている。この変化と同期して、BH-1ほど顕著ではないが、97FT01の歪記録 97FT01 N111Eが縮み、97FT01 N351Eと97FT01 N231Eが伸びの変化が観測されている（それぞれ 10^{-6} オーダー）。これらの観測記録は東濃鉱山での水位上昇の影響が北へ約400m離れた賤洞観測点に及んでいることを示している。

[歪解析と考察] BH-1と97FT-01の歪記録を解析するに当たって、2014年11月1日0時0分の記録をそれぞれ初期値とした。また歪変化がほぼ収まったと考えられる2015年5月1日0時0分の記録を変化終了時とした。歪解析の結果、BH-1では最大主歪 -1.075×10^{-6} strain、最小主歪 -5.448×10^{-5} strain、面積歪 -5.556×10^{-5} strainと縮みの場である。特に東北東－西南西方向に縮みが卓越する。これは2014年12月9日に排水ポンプを停止したことにより坑道内の冠水が進行するとともに、BH-1の歪計周辺の土岐花崗岩中の間隙水圧が上昇したことが原因と考えると観測事実を説明することが出来る。一方 97FT-01では、最大主歪 $+2.658 \times 10^{-6}$ strain、最小主歪 -4.692×10^{-6} strainであり北北東－南南西方向に伸び、西北西－東南東方向に縮みの変化である。変化量はBH-1よりオーダー1小さい。面積歪としては縮みの場であり（ -2.035×10^{-6} strain）これはBH-1と同様、97FT-01の歪計周辺の土岐花崗岩中の間隙水圧上昇が原因と考えられる。講演では歪解析結果の詳細を述べ、鉱山周辺の水理地質構造との対比・考察を行う予定である。

キーワード：地下坑道再冠水、歪観測、地下水位観測

Keywords: reflood of the underground gallery, Strain observation, Groundwater level observation

断層帯の水理属性の見積もり - 長野県北部地震に伴う湧泉を用いた例

Estimate of hydraulic properties of the crust - An example from water discharge by Naganoken-Hokubu earthquake

*田中 秀実¹、Ma Kuo-Fong²、佐藤 努³、角森 史昭¹、松本 則夫³、梅田 浩司⁵、風早 康平³、藤澤 和謙⁴、楠原文武¹

*Hidemi Tanaka¹, Kuo-Fong Ma², Tsutomu Sato³, Fumiaki Tsunomori¹, Norio Matsumoto³, Koji Umeda⁵, Kohei Kazahaya³, Kazunori Fujisawa⁴, Fumitake Kusuhara¹

1.東京大学大学院理学系研究科、2.台湾國立中央大学地球物理研究所、3.産業技術総合研究所地質調査所、4.京都大学農学部、5.日本原子力開発機構東濃地科学センター

1.School of Science, The University of Tokyo, 2.Institute of Geophysics, National Central University, Taiwan, ROC Institute of Geophysics, National Central University, Taiwan, ROC, 3.Geological Survey, AIST, 4.Graduate school of Agriculture, Kyoto University, 5.Tono Geoscience center JAEA

On November 28, An M 6.7 earthquake occurred at northern part of Nagano Prefecture, Central Japan. The Kamishiro Fault, which has been well known as to be a part of Itoigawa-Shizuoka Tectonic Line, was activated by the earthquake and surface rupture about 9 km in length was appeared along its trace.

Post-seismic fluid discharge was observed from the fracture zone of the Kamishiro Fault. Our team has been observed and monitored the flow amount and chemical characteristics of the fluid for about 5 months from one week after the earthquake.

In this presentation, we describe the occurrence of earthquakes and its relation to the hydraulic properties and discuss about the governing equations of fluid flow in fracture zone of the Kamishiro Fault.

キーワード：長野県北部地震、神城断層、湧泉、断層破碎帯、水理属性

Keywords: Naganoken-Hokubu earthquake, Kamishiro Fault, Fluid discharge, Fracture zone, Hydraulic property

東北地方におけるスラブ起源深部流体の上昇について

Distribution of slab-derived fluid mixed into groundwater system in NE Japan arc

*風早 康平¹、東郷 洋子¹、高橋 浩¹、高橋 正明¹、安原 正也¹、佐藤 努¹、堀口 桂香¹、森川 徳敏¹、岩森 光²、田中 秀実³

*Kohei Kazahaya¹, Yoko Togo¹, Hiroshi Takahashi¹, Masaaki Takahashi¹, Masaya Yasuhara¹, Tsutomu Sato¹, Keika Horiguchi¹, Noritoshi Morikawa¹, Hikaru Iwamori², Hidemi Tanaka³

1.産業技術総合研究所活断層・火山研究部門、2.海洋研究開発機構・地球内部物質循環研究分野、3.東京大学大学院理学系研究科

1.Geological Survey of Japan, AIST, 2.Geochemical Evolution Research Program, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3.School of Science, The University of Tokyo

Li/Cl指標をスラブ由来の塩水検出に用いることにより、西南日本弧においては、広域に深層地下水にスラブ起源水が混入していることがわかっている(風早ほか, 2014)。本発表では、東北日本弧におけるスラブ起源水の分布について地下水の分析結果を用いて検討を行った結果を示す。東北日本弧では、西南日本弧におけるスラブ起源水の分布特徴が異なる。また、スラブ起源の端成分についても、分布特徴同様に違いがある。その原因は、主にプレート及びその沈み込み様式の違いにより説明が可能である。一方で、Li/Clを用いる手法には問題点が挙げられる。東北日本弧では、内陸においても古い海水が堆積盆地に存在し、スラブから地表付近の塩水地下水系に供給される熱水流体は検出できないという問題がある。東北日本弧では、天水-海水-続成水-スラブ起源水の複雑な混合を生じているため、より詳細かつ正確な地下水のLi, Cl, Br, Iの分析によるスラブ水の混合率を示すための手法について示す。

キーワード：スラブ起源深部流体、東北日本弧、地下水

Keywords: slab-derived fluid, NE Japan arc, groundwater

曹長石のメカノケミカル粉碎による表面ラジカルの生成とその定量

The behavior of surface radicals on mechanochemically activated silicates

尾張 雄太¹、*稲生 千咲²、増本 広和²、亀田 純³Yuta Owari¹, *Chisaki Inaoi², Hirokazu Masumoto², Jun Kameda³

1.北海道大学 理学部 地球惑星科学科、2.北海道大学 大学院理学院 自然史科学専攻、3.北海道大学 大学院理学研究院 地球惑星科学部門

1.Department of Earth Sciences, School of Science, Hokkaido University, 2.Department of natural history sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, 3.Department of Earth and Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University

活断層近傍の土壌中には、高濃度の水素ガスが胚胎されていることが知られている (Wakita et al., 1980; Sugisaki et al., 1983)。このような水素ガスは、断層活動によって生成される鉱物の新生表面と流体との反応 (メカノケミカル反応) により発生していると考え (Wakita et al., 1980)、その後、多くの実験により鉱物の破壊に伴う水素ガスの発生が確認された (e.g., Kita et al., 1982, Kameda et al., 2003)。しかしながら、実験により生成される水素ガスがラジカル反応によって生成されたものであるのかは十分に検討されているとは言えなかった。

DeLogu (2011) は、ラジカル捕捉剤である2,2-ジフェニル-1-ピクリルヒドラジル (DPPH) を溶かしたエタノール溶液を粉碎媒体とする石英の破碎実験を行い、試料の破碎に伴う水素ラジカル発生量を吸光分析により直接的に評価した。本研究では、この手法を、断層に含まれるその他の鉱物種として曹長石にも適用し、鉱物の破壊に伴う水素ラジカル生成量の定量化を試みた。

石英および曹長石を用いた実験の結果、試料破碎により水素ラジカルが発生することが確認された。また粉碎の進展に伴う比表面積の増加とともに、水素ラジカル発生量が増加することが確認された。石英と曹長石における水素ラジカル発生量を比較すると、後者では発生量が大幅に少なかった。水素ラジカルは、ケイ酸塩鉱物中のSi-O結合が切断されSiラジカルが新生表面上に生成した際に、H₂O (本研究ではエタノール) と反応して生成されると考えられる。曹長石において劈開の発達しやすい(010)および(001)面におけるSiラジカル密度は、石英のおよそ1/6程度と見積もられるので、この結果は妥当であると言える。また、Hochstrasser and Antonini (1972) はアルカリ金属によりラジカル生成量が抑制されることを報告しており、このことも先の実験結果と調和的である。

また、本研究の結果から算出される新生表面の単位面積あたりの水素ラジカル発生量を、Kameda et al. (2003) が報告した水素ガスの発生量と比較すると、水素ラジカル発生量の方が一桁以上大きいことが分かった。このことは、発生した水素ラジカルの大部分が水素分子として結合することなく消失していることを示唆している。

キーワード：ラジカル反応、メカノケミストリー、水素ガス

Keywords: radical reaction, mechanochemistry, hydrogen gas

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