

結晶質岩におけるボーリング調査の進展に伴う亀裂の分布特性に関するデータの変遷 Relationship between progress of borehole investigations and the geometric data of fractures at the crystalline rocks

石橋 正祐紀^{1*}; 笹尾 英嗣¹; 中畠 誠門²; 渥美 博行²; 尾上 博則¹; 三枝 博光¹; 川端 淳一²; 升元 一彦²; 瀬野 昭治²; 岩野 圭太²

ISHIBASHI, Masayuki^{1*}; SASAO, Eiji¹; NAKAJIMA, Makoto²; ATSUMI, Hiroyuki²; ONOE, Hironori¹; SAEGUSA, Hiromitsu¹; KAWABATA, Junichi²; MASUMOTO, Kazuhiko²; SENO, Shoji²; IWANO, Keita²

¹ 日本原子力研究開発機構, ² 鹿島建設 株式会社 技術研究所 岩盤・地下水グループ

¹Japan Atomic Energy Agency, ²Kajima Corporation Technical Research Institute Rock Mechanics and Hydrogeology Group

高レベル放射性廃棄物の地層処分や LPG の地下備蓄など、地下空間の利用にあたっては、割れ目や断層などの地下水の流動経路となる地質構造の把握が重要であり、特に結晶質岩のような亀裂性媒体では、亀裂の分布特性を明らかにする必要がある。地下深部における結晶質岩中の亀裂の分布は主にボーリング調査で把握されるが、亀裂の走向傾斜とボーリング孔との交差角に起因する遭遇率の違いより、ボーリング調査で取得した情報に基づく評価には過不足が生じることが考えられる。亀裂の分布特性を精度よく把握するためには、ボーリングの調査量を増やすことが考えられるが、必要な調査量や調査手順と言った調査の最適化のための方法論は十分に確立されているとは言えない。そこで、本研究では、100m 立方領域でのボーリング調査の進展に伴う亀裂の分布特性に関する情報量の変化について検討した。

本研究では、瑞浪超深地層研究所の深度 300m の水平坑道に分布する土岐花崗岩を対象に亀裂ネットワークモデル (DFN モデル) を構築し、モデルに仮想ボーリング孔を掘削した際の単位長さあたりの亀裂数 (以下、 P_{10}) に着目した。DFN モデルは、100m 立方の空間を対象に、亀裂の長さはべき乗分布、亀裂方位分布は Fisher 分布、亀裂の空間分布はポアソン分布を仮定した。構築した DFN モデルの P_{10} (以下、 $P_{10_{DFN}}$) は、1.58 本/m (このうち、NW 走向高角度傾斜の亀裂 (卓越方位は $N29^{\circ} W87^{\circ} E$) は 1.34 本/m, NE 走向高角度傾斜の亀裂 (卓越方位は $N43^{\circ} E88^{\circ} W$) は 0.12 本/m, 中~低角度の亀裂 (卓越方位は $N25^{\circ} E8^{\circ} E$) は 0.12 本/m), べき乗数は 4.0 である。仮想ボーリング孔は、DFN モデル中央部を通過するように、EW, NS, 鉛直の各方向に 5 本 (各 100m) を配置した。

仮想ボーリング孔と交差した亀裂の P_{10} (以下、 $P_{10_{BH}}$) の平均は、EW 方向の水平孔 (以下、EW 孔) で 1.87 本/m (1.18~1.95 本/m), NS 方向の水平孔 (以下、NS 孔) で 1.13 本/m (0.91~1.24 本/m), 鉛直方向の孔 (以下、鉛直孔) で 0.78 本/m (0.73~0.83 本/m) であった。 $P_{10_{BH}}$ と $P_{10_{DFN}}$ とを比較すると、EW 孔で 0.29 本/m, NS 孔で 0.45 本/m, 鉛直孔で 0.8 本/m の差が認められ、鉛直孔で最も大きな相違となった。亀裂の卓越方位ごとにもみると、鉛直孔では中~低角度の亀裂群については $P_{10_{BH}}$ が $P_{10_{DFN}}$ よりも大きく、NW 走向高角度傾斜の亀裂群については $P_{10_{DFN}}$ よりも小さい。すなわち、鉛直孔で遭遇しやすい中~低角度の亀裂群が過大に評価され、DFN モデル中で最も卓越する NW 走向高角度傾斜の亀裂群は過小評価されており、亀裂方位ごとに取得される情報の偏りが確認された。そのため、亀裂群との遭遇率が等しくなると考えられる亀裂の卓越方位の法線ベクトルの平均方向を掘削方向とした仮想ボーリング孔 (以下、法線平均孔) について検討した。その結果、法線平均孔での $P_{10_{BH}}$ の平均は 1.45 本/m (1.34~1.67 本/m) で、 $P_{10_{DFN}}$ との差が 0.13 本/m となり、EW 孔, NS 孔および鉛直孔およびそれぞれで得られた $P_{10_{BH}}$ の和の平均よりも $P_{10_{DFN}}$ に近い値が得られた。すなわち、亀裂の方向分布を考慮せずに掘削されたボーリング孔で得られる P_{10} の平均を用いても、取得されたデータの偏りを補正することは困難であると考えられる。

次に、仮想ボーリング孔の掘削方位ごとの調査量と $P_{10_{BH}}$ の変化について検討した。その結果、全方向の仮想ボーリング孔において、約 100m~200m 分 (仮想ボーリングで 1~2 本) 掘削した段階で $P_{10_{BH}}$ が安定する傾向が認められた。また、安定した際の $P_{10_{BH}}$ は、各方向の 5 本の仮想ボーリングで得られた $P_{10_{BH}}$ の平均に概ね等しい。このことから、同一方向の調査量を増やしても、ある調査量に達した時点で、得られる情報の変化は小さくなり、その値は同一方向の調査で得られる情報の限界を示していると考えられる。以上のことから、坑道から 100m 立法領域の調査を想定すると、亀裂の空間分布が一樣な場を対象とする場合は、総掘進長を約 100m 以上とし、掘削方向は亀裂との遭遇率が均一となる方向 (亀裂の卓越方位の法線ベクトルの平均方向) を選択することが有効と考えられる。

本研究の結果、亀裂の分布特性に関するデータを取得するためには、亀裂の卓越方位との遭遇率を考慮した調査計画を立案し、調査の進展とデータの関係から調査量の十分性を考慮することが重要であることが示唆された。すなわち、亀裂分布が一樣と想定できる場においては、既存情報などから把握された亀裂の卓越方向に基づいて掘削方向を決定し、最初のボーリング調査の結果から得られた亀裂の卓越方位分布から、再度掘削方向を検討することが有効と考えられる。

キーワード: ボーリング調査, DFN モデル, 調査方法, 亀裂密度

Keywords: Borehole investigation, DFN model, Methodology, Fracture intensity

割れ目間隔を利用した割れ目帯区分の試み—岐阜県南東部に分布する土岐花崗岩を例として— Characterization of the fracture zone on the basis of fracture spacing, case study at the Toki granite, central Japan

笹尾 英嗣^{1*}; 石橋 正祐紀¹
SASAO, Eiji^{1*}; ISHIBASHI, Masayuki¹

¹ 日本原子力研究開発機構地層処分研究開発部門
¹ Japan Atomic Energy Agency

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、割れ目や断層などの地下水の流動経路となる地質構造の把握が重要であり、結晶質岩においては、割れ目の数や分布特性に関する情報の取得が必要である。

日本原子力研究開発機構では、岐阜県南東部に分布する土岐花崗岩を対象として掘進長 500m 以上の深層ボーリング調査を行ってきた。この結果、土岐花崗岩の割れ目は上部で多く、下部で少ないことから、割れ目頻度に基づいた地質構造区分を行ってきた(三枝ほか, 2007)。しかし、岩体スケールでは、深度方向の割れ目頻度の変化が不明瞭な場合があり、また水平方向の割れ目頻度の変化も認められる。

割れ目を評価する上では、割れ目の分布特性に基づいて割れ目帯を区分し、割れ目帯ごとにモデル化が行われる。割れ目の分布特性としての割れ目頻度は、一般にある長さあたりの割れ目本数で表される。しかし、この本数はある区間の平均値であるため、割れ目分布の不均質性を考慮した割れ目帯区分には向かない面もある。そこで、本研究では、ボアホールカメラで把握した割れ目の交差深度から割れ目間隔を求め、それに基づいた割れ目帯区分の可能性を検討した。

割れ目の情報は、一般にはボアホールカメラによって、交差深度および走向・傾斜が取得される。対象としたボーリングは 15 孔、花崗岩の掘進長約 12,000m 分で、割れ目本数は約 32,800 本である。本研究では、ボーリング孔ごと、および全ボーリング孔の割れ目間隔の累積頻度曲線を作成し、50 パーセント値と 90 パーセント値に基づいた検討を行った。その結果、全ボーリング孔で観察された割れ目では、50 パーセント値と 90 パーセント値の間隔は 0.2m と 0.8m であった。つまり、土岐花崗岩全体で見ると、地表から深度 1000m 程度までの領域においては、1m 以下の間隔で割れ目が非常に多く発達しているといえる。

ところで、割れ目の成因について、低角度傾斜(傾斜角が平面から 30° 以下のもの)の割れ目とその他の割れ目で異なる可能性が指摘されている(笹尾・石橋, 2013)。特に、低角度傾斜の割れ目は、花崗岩が地表に露出した際の除荷によって形成されたと考えられており、岩体上部に集中している可能性がある(笹尾・石橋, 2013)。そこで、次に、低角度傾斜割れ目とその他(傾斜角が 30° を超す割れ目; 以下、中~高角度傾斜割れ目と呼ぶ)に分けて検討した。15 孔で認められた全割れ目のうち、低角度傾斜割れ目の間隔の 50 パーセント値と 90 パーセント値は 0.3m と 2.2m であるのに対して、中~高角度傾斜割れ目では 0.2m と 1.1m であった。このことから、土岐花崗岩では中~高角度傾斜が特に密集して発達していることがわかる。なお、割れ目本数は、低角度傾斜割れ目が 10,156 本、中~高角度傾斜割れ目が 22,618 本であった。

次に、ボーリング孔ごとに、割れ目本数と間隔の関係および割れ目分布の地域性について検討した。ここでは、岩体北西部に位置し、割れ目本数が最も少ない DH-3 号孔、岩体北東部に位置し、割れ目本数が中程度の DH-10 号孔、および岩体南部に位置し、割れ目本数が最も多い MIU-3 号孔について述べる。各ボーリング孔における割れ目本数、および間隔の累積頻度の 50 パーセント値と 90 パーセント値は以下の通りであった。

DH-3 号孔(掘進長 1011.4m)

全割れ目; 471 本, 0.3m, 1.8m
低角度傾斜割れ目; 84 本, 0.9m, 10.9m
中~高角度傾斜割れ目; 387 本, 0.4m, 2.3m

DH-10 号孔(掘進長 1012.3m)

全割れ目; 1,998 本, 0.2m, 1.3m
低角度傾斜割れ目; 448 本, 0.5m, 7.2m
中~高角度傾斜割れ目; 1,550 本, 0.2m, 1.6m

MIU-3 号孔(掘進長 1014m, うち花崗岩の掘進長 926m)

全割れ目; 3,764 本, 0.2m, 0.6m
低角度傾斜割れ目; 1,455 本, 0.2m, 1.4m
中~高角度傾斜割れ目; 2,309 本, 0.2m, 0.9m

この検討から、割れ目間隔は 1m 以下のものが全体の半数を占めるものの、全体としては割れ目本数が多いほど割れ目

HCG36-02

会場:411

時間:4月29日 15:30-15:45

間隔が小さいことがわかる。このことから、割れ目の多くは狭い範囲に密集して分布していることが示唆される。特に、中～高角度傾斜割れ目では、割れ目本数に関わらず、50パーセンタイル値に大きな違いがないことから、割れ目帯の識別や岩体スケールでの割れ目帯の分布を把握するためには、数十 cm 以下の間隔で割れ目が発達する割れ目密集部の有無を把握し、その分布に基づいて割れ目帯を区分していくことが考えられる。

今後は、割れ目間隔の深度方向および水平方向の変化と、割れ目密集部の抽出方法を検討し、割れ目密集部の分布に基づく割れ目帯の区分について具体的に示していくことが課題として挙げられる。

三枝ほか (2007) 日本原子力研究開発機構研究開発報告書類, JAEA-Research 2007-043.
笹尾・石橋 (2013) 日本地質学会第 120 年学術大会講演要旨, p.195.

キーワード: 割れ目帯, 割れ目間隔, 土岐花崗岩

Keywords: fracture zone, fracture spacing, Toki granite

現実的ニアフィールドプロセスの検討 Examination of realistic conceptual model of near-field process in HLW repository

吉田 英一^{1*}; 小島 圭二²; 大西 有三³; 朽山 修⁴; 西垣 誠⁵; 登坂 博行⁶; 杉原 弘造⁷; 尾方 伸久⁷
YOSHIDA, Hidekazu^{1*}; KOJIMA, Keiji²; OONISHI, Yuzo³; TOCHIYAMA, Osamu⁴; NISHIGAKI, Makoto⁵; TOSAKA,
Hiroyuki⁶; SUGIHARA, Kozo⁷; OGATA, Nobuhisa⁷

¹名古屋大学, ²地圏空間研究所, ³関西大学, ⁴原子力安全研究協会, ⁵岡山大学, ⁶東京大学, ⁷日本原子力研究開発機構
¹Nagoya University, ²Geospace Labo, ³Kansai University, ⁴Nuclear Safety Research Association, ⁵Okayama University, ⁶University
of Tokyo, ⁷Japan Atomic Energy Agency

地層処分におけるニアフィールド (NF) 環境 (ここでは、安全評価上のスケールとして処分場および、その周辺の約 100 メートル程度を想定した範囲として扱っている) では、様々な現象が連鎖的に、かつ相互的に関連・干渉し合いながら進行することが共通の認識となっている。しかしながら、これまでの安全評価においては、ニアフィールドにおける諸現象およびそれらの複合反応については、その重要性を理解し検討はなされているものの、地下環境の原位置に関する知見に限りがあったことなどから、日本の地下環境に関する現実的な知見を十分に反映したコンセプトであるのかどうかも含め、変動帯地下環境における適切な概念モデルであるのかの検討がなされた状況にはない。

これらの背景のもと、2000 年以降の知見を俯瞰しつつ、とくに深地層の研究施設における原位置の知見を反映させ、日本の変動帯地質環境における、より現実的なニアフィールドプロセスを抽出すると共にニアフィールドコンセプトを構築し、将来の地層処分事業に対してより効率よく応用し得るものにするを目的として検討を進めている。

本発表では、これまでの検討内容から日本の地下環境 (とくに結晶質岩系において) として、おおよそ現実的に想定される水みち等の構造モデルや、工学的技術 (とくにグラウチング) について、その考え方と課題について報告する。

キーワード: 地層処分, ニアフィールドプロセス

Keywords: Geological Disposal of Radioactive Waste, Near filed processes

放射性廃棄物地層処分に対する超長期の安全評価への反映を目的とした風化帯に関する情報の整理 An approach to establish information basis of Weathered zone for the Safety Assessment to HLW Disposal over long-term.

注連本 英典^{1*}; 若杉 圭一郎²; 柴田 雅博²; 山口 正秋²
SHIMEMOTO, Hidenori^{1*}; WAKASUGI, Keiichiro²; SHIBATA, Masahiro²; YAMAGUCHI, Masaaki²

¹ 日本原子力研究開発機構 *現所属:三菱マテリアルテクノ株式会社, ² 日本原子力研究開発機構
¹Japan Atomic Energy Agency (*Present position: Mitsubishi Materials Techno Corporation), ²Japan Atomic Energy Agency

1. はじめに

放射性廃棄物の安全評価では、超長期の地質環境条件の変遷を考慮する必要がある。継続的な隆起・侵食作用によって長期間のうちに処分場が地表に近接するようなシナリオに対しては、地下浅部の環境に基づいて核種移行の評価を行う必要がある。一般に、地下深部は還元環境で遅い地下水流速が期待されるのに対し、地下浅部では風化作用により酸化的環境が形成され、水理特性、化学条件等について地下深部とは異なることが考えられる。そこで、本研究では、超長期の地層処分システムの安全評価における環境条件の設定に資するため、既存文献の調査により、風化帯についての情報の整理を行った。

2. 手法

本研究では、風化帯に関する情報を文献調査により収集し、下記の項目について整理を行った。調査は「風化」をキーワードとするインターネット検索を行い、公開論文、学会講演資料等を収集した。調査で着目した点は、核種移行評価モデルを構築するための前提となる場の状態設定に資する観点から、以下のとおりである。

- ①風化帯の厚さ
- ②風化帯の地形との関係
- ③風化帯の地質環境条件(水理、化学環境条件(特に酸化還元条件)等)

また、これらが、岩種、地形、あるいは履歴などによって分類が可能でそれぞれに異なる特徴を持つかについても、検討を試みた。

3. 調査結果

①: 本集計における風化帯の厚さは、最大 150m に及ぶ。10m ごとの頻度分布では、母集団が少ないものの(N=37)、60m までの範囲に 33 箇所が含まれている。80~100m に見られる 3 箇所は花崗岩の事例で、温暖~冷温の湿潤な気候下で形成された風化と地殻変動に伴う岩盤の破碎作用が風化に関係するものがある(木宮,1975; 稲井・黒田,1968)。140~150m の事例はカルデラ内の溶岩や火砕流堆積物(火山岩類)で、長期間継続した常温風化と熱水変質等の高温酸化によるもの(横田ほか,2003)と考えられている。

堆積岩では、赤石山地の褶曲作用を受けた砂岩や頁岩において風化殻の厚さが 100m に及んでいる報告もある(徳山(1986)、具体的な場所不明のため本集計には含まれない)。

②: 風化帯と地形との関係を検討した結果、互いが平行(調和的)、風化帯が地形に無関係に水平、地形に斜行、地形に対し不規則、の4パターンに類型化した。各パターンの形成因子は、風化プロセス、隆起・侵食による影響、気候、岩種などであり、パターンにより形成因子の組み合わせや、個々の形成因子が及ぼす影響の度合いが異なる。

例えば、“地形に無関係に水平”は深層風化に強く依存し、風化帯形成時の気候、その後の穏やかな隆起・侵食、などが主な形成因子である。なお深層風化は、地形的には小起伏面あるいは準平原であることが多いとされる(木宮, 1981)。

③: 風化帯内部の地質環境条件は、地層岩石の引張強度や空隙率などの物性について比較的情報が得られる反面、酸化還元電位や透水性についての情報は限られている。

千木良(1988)は第四系泥岩の風化において、黄鉄鉱の溶解などにより pH が低下する溶解帯の上部が酸化帯であり、酸化フロントが地下水面付近にあることを報告するとともに、酸化フロント等と風化の進行との関係について推論している。

大山ほか(2009)は、六カ所サイトの試験空洞周辺の軽石凝灰岩や凝灰岩中の酸化還元電位を原位置で計測し、酸化帯(褐色部)で+400~+600mV、還元帯(灰色部)で+200mV 以下の値を報告した。

泥岩や泥質片岩の風化帯透水性は、透水係数等の直接的な情報が極めて少ないが、間隙率について報告事例がある(千木良,1988; 山崎・千木良,2008)。泥岩の例(千木良,1988)では、酸化帯で最も大きな値を示した後、溶解帯との境界下

HCG36-04

会場:411

時間:4月29日 16:15-16:30

部から減少して、新鮮岩帯で収束する傾向を示す。

花崗岩の風化帯透水性についても直接的な情報は少ないが、空隙率は風化部から地表に向かい漸移的に変化（増加）する傾向が報告されている（鈴木,1977）。

花崗岩の地下水質が地表から地下に向かい弱酸性から弱アルカリ性に変化する傾向は、既知（金井ほか,1998；JNC,1999）のとおりであるが、風化帯との対応は確認できなかった。

4. まとめおよび課題

わが国の風化帯の特徴や履歴、地形との関係について、関連する文献の調査を通じて、風化帯の厚さを整理すると共に、風化帯と地形との関係を類型化した。また、類型化したパターンと、風化帯の履歴（風化プロセスやその隆起・侵食や地形変化との関係）、風化帯の形成条件（気候、地下水に関する条件、岩種など）、現れる特徴（地形、風化帯の拡がり）等の関係について、表形式での整理を検討した。

本検討は、地層処分の安全評価に必要となる風化帯の状態設定のための基盤情報の整備を目的としているが、今後は現在の風化帯の情報に加えて、長期の時間変遷による風化帯の形状や地質環境条件の変化についての継続的な調査と、時間軸を考慮した条件変化のパターンの検討が必要である。

キーワード: 地層処分, 超長期, 安全評価, 風化帯, 地形, 地質環境条件

Keywords: HLW, Long-term, Safety Assessment, Weathered Zone, Landform, Geological Environmental Conditions

ヘリウム同位体比を考慮したベイズ統計学による未知の活断層の評価 A Bayesian approach to assess the probability of concealed active faults existing using helium isotope ratios

マーティンアンドリュース^{1*}; 石丸 恒存²; 梅田 浩司²; 浅森 浩一²
MARTIN, Andrew^{1*}; ISHIMARU, Tsuneari²; UMEDA, Koji²; ASAMORI, Koichi²

¹ スイス放射性廃棄物管理共同組合, ² 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター
¹NAGRA, ²Tono Geoscience Center, JAEA

放射性廃棄物の地層処分のサイト選定や原子力施設の安全性評価などを念頭に、我が国においては地質環境の長期安定性に関する研究など多くの研究開発が進められてきているが、その中で活断層の時空分布を理解することは特に重要と考える。この場合、地表部に破断が及んでいなかったり地形に痕跡の残らない活断層（いわゆる「未知の活断層」）の存在をどのように考慮するかということが課題である。

一般に火山地域の地下水中に検出される高 He-3/He-4 比は、非火山地域の地下水にも検出される場合がある。非火山地域の高 He-3/He-4 比は断層等を移行経路としたマントル物質の脱ガスが原因であると考えられている（例えば Kennedy et al., 1997）。鳥取県西部地域を対象とした研究（Umeda and Ninomiya, 2009）では、He-3/He-4 比の分布が 2000 年鳥取県西部地震（Mw 6.8）の震源断層（地震以前は活断層として認定されていなかった）の存在を示す間接的な証拠となりうる可能性を示した。

本発表では、この仮説を定量的に表現するため、He-3/He-4 比をベイズ法によって組み込んだ推論モデルの開発について紹介する。ベイズ法の枠組みにおいて、まず最初に研究対象地域のテクトニックセッティングに基づく先験的前提（a priori assumption）を設定する。既知の活断層のトレースは、同じ距離間隔をもったセグメントに区分されている。未知の活断層セグメントは、既知の活断層セグメントの分布からそれほど離れていないということを今回の先験的前提としている。さらに、既知の活断層からの距離が近いほど対象地域での「未知の活断層」の存在確率は大きくなると仮定する。そして、既知の活断層セグメント分布を中心としてカーネル関数（kernel functions）を用いて（Martin et al., 2003）、未知の活断層の存在について二次元の事前（a priori）確率分布を計算する。その際、未知の活断層セグメントの存在確率が離間距離に応じてゼロにならないように、保守的にコーシー確率密度関数（PDF）を選択している。

次の段階では Martin et al. (2004, 2012) による手法を適用して、コルモゴロフ・スミルノフ検定（Kolmogorov-Smirnov statistical tests）に基づいて He-3/He-4 比の分布を「Likelihood 関数」と呼ばれている PDF の中に再配置する。そして、ベイズの定理を用いて、事前確率分布と Likelihood 関数を組み合わせることで事後（a posteriori）確率分布を計算する。

2000 年鳥取県西部地震が起こる以前のデータを使って計算した事後確率分布では、未知の活断層の存在確率が震源域において増加していることが示された。言い換えれば、鳥取県西部地域を対象に計算した事後確率分布は、活断層がマントル起源の希ガスの移行経路となっているという仮説を裏付けるものとも言えるだろう。

発表では、今回の手法を用いて他のデータ（例えば重力・地殻の歪み速度など）を組み込む可能性についても議論する。

引用文献

- Kennedy et al. (1997), Mantle fluids in the San Andreas fault system, California, *Science*, 278, 1278-1281.
Martin et al. (2003) *Acta Geophys.* 51, 271-289
Martin et al. (2004) *J. Geophys. Res.*, 109, B10208, doi:10.1029/2004JB003201.
Umeda, K. and Ninomiya, A. (2009) *Geochem. Geophys. Geosys.*, 10, Q08010, doi:10.1029/2009GC002501.
Martin A. J., Umeda K. and Ishimaru T. (2012) *InTech Pub.*, doi:10.5772/51859

キーワード: 活断層, ベイズ法, ヘリウム同位体比
Keywords: Active fault, Bayesian, Helium isotope ratio

南九州の剪断帯の深部比抵抗構造と地下水中のヘリウム同位体比 An active shear zone, southwest Japan: electromagnetic geophysics and noble gas geochemistry

梅田 浩司^{1*}; 浅森 浩一¹; 幕内 歩¹; 小堀 和雄¹
UMEDA, Koji^{1*}; ASAMORI, Koichi¹; MAKUUCHI, Ayumu¹; KOBORI, Kazuo¹

¹ 日本原子力研究開発機構
¹ Japan Atomic Energy Agency

宮崎市南部から霧島火山群を経て鹿児島県北西部に至る地域は、1961年吉松地震 (M=5.5)、1968年えびの地震 (M=6.1)、1994年大口地震 (M=5.7)、1997年鹿児島県北西部地震 (M=6.5, 6.3) 等、東-西~西北西-東南東方向の高角左横ずれを示す地震列が存在する (角田・後藤, 2002)。また、GPSデータの解析等によって推定されている北緯 32° の東西に延びる剪断帯もこの地震列に相当する。これらの剪断帯が生じた原因としては、沖縄トラフの拡大に伴うマントル上昇流による地殻の引きずり (Takayama and Yoshida, 2007) や九州・パラオ海嶺の沈み込み (Wallace et al., 2009) 等のモデルが提唱されているが、この地域には活断層の存在を含む明瞭な変動地形が認められないことから、剪断帯を伴う地殻変動は地質学的に極めて新しい時代に開始したものと考えられる。

筆者らは霧島火山群の西側の剪断帯 (1997年鹿児島県北西部震源域) の地殻~上部マントル構造を把握するため、地磁気・地電流観測による三次元比抵抗構造解析を行った。その結果、地下 10 km 以深から上部マントルに達する東西方向に延びる低比抵抗帯が存在し、その周辺 (高比抵抗帯との境界部) に上記の地震が発生していることが明らかになった。また、この低比抵抗帯は、白亜紀の四万十層群や中新世の紫尾山花崗閃緑岩の地域に位置するが、ここで採取した地下水の溶存ガスや遊離ガスに含まれるヘリウム同位体比 ($^3\text{He}/^4\text{He}$ 比) は、大気の 4 倍以上の値を示す。このことは、低比抵抗帯は地殻内に侵入したマントル起源の流体によって生じたものであることを示唆する。新しい剪断帯の形成に代表されるこの地域のネオテクトニクスは、マントル起源の流体や霧島火山群のマグマ活動 (約 30 万年前以降) によって生じた地殻の不均質性が関与している可能性がある。

キーワード: 1997 鹿児島県北西部地震, 剪断帯, 比抵抗構造, ヘリウム同位体

Keywords: 1997 Kagoshima earthquake doublet, active shear zone, magnetotelluric sounding, helium isotope

東京電力福島第一原子力発電所事故により放出された放射性セシウムの移動現象を規定する主要因について－福島県の山地森林の例－
Predominant process for transport of radiocaesium released by the TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident

新里 忠史^{1*}; 石井 康雄¹; 阿部 寛信¹; 渡辺 貴善¹; 佐々木 祥人¹
NIIZATO, Tadafumi^{1*}; ISHII, Yasuo¹; ABE, Hironobu¹; WATANABE, Takayoshi¹; SASAKI, Yoshito¹

¹ 日本原子力研究開発機構福島環境安全センター

¹Fukushima Environmental Safety Center, Japan Atomic Energy Agency

東京電力福島第一原子力発電所から放出された放射性セシウムは住民被ばくの主要因となる放射性核種であることから、その環境動態に関する理解は福島環境回復における基盤情報を提供する。現時点における放射性セシウムの主な供給源は、除染活動がまだ試験段階にある山地森林の分布域である。このため、山地森林から流出する放射性セシウムの移動現象と移動フラックス及び化学形態に関する知見は、山地森林から河川を経て海域に至る放射性セシウムの環境動態を考慮した被ばく線量評価において極めて重要な位置を占める。

本報告では、福島県の阿武隈山地に分布する山地森林において、放射性セシウムの移動現象を規定する主要因について議論する。調査地点は福島県東部の阿武隈山地において、植生、地形及び土壌種の異なる4か所を設定した。土壌試料は、山地の尾根、斜面及び谷底面において、土壌サンプラー及びスクレーパープレートにてそれぞれ40 cm及び20 cm深度まで採取した。調査地点では、表面流と土砂流亡をモニタリングするための40-60 m²面積を有する観測プロットを併せて設置した。土壌試料の分析の結果、森林土壌の極表層部における放射性セシウムの濃度は森林内の地形要素に関連しており、谷底といった堆積域で高く、山地斜面といった侵食域で低い傾向にあった。加えて、土壌粒子や植物片といった表面流出に含まれる固相の放射性セシウム濃度は、表面流出の液相と比較して1~2桁高い傾向にあった。

そのため、福島県の山地森林における放射性セシウムの移動現象を規定する主要因は、山地斜面における土砂の引きはがしを伴う表面流出と考えられ、山地森林における放射性セシウムの移動現象を検討する際には、対象地域における気象、植生、地形、及び土壌条件といった自然地理、地形及び地質学的要素に関する情報を総合的に捉える必要がある。

キーワード: 放射性セシウム, 環境動態, 山地森林, 原子力事故, 福島

Keywords: radiocaesium, environmental dynamics, mountain forest, nuclear accident, Fukushima

高速増殖原型炉もんじゅ敷地内破碎帯等の追加地質調査の現況について Current State of the additional geological surveys of crush zones at the fast breeder prototype reactor "Monju" site

石丸 恒存^{1*}; 島田 耕史¹; 佐々木 亮道¹; 田中 遊雲¹; 宮崎 真之¹; 安江 健一¹; 丹羽 正和¹; 末岡 茂¹; 梅田 浩司¹; 池田 真輝典¹

ISHIMARU, Tsuneari^{1*}; SHIMADA, Koji¹; SASAKI, Akimichi¹; TANAKA, Yukumo¹; MIYAZAKI, Masashi¹; YASUE, Ken-ichi¹; NIWA, Masakazu¹; SUEOKA, Shigeru¹; UMEDA, Koji¹; IKEDA, Makinori¹

¹ (独) 日本原子力研究開発機構

¹ Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

経緯: (独) 日本原子力研究開発機構の高速増殖原型炉もんじゅ (以下、「もんじゅ」) においては、平成 25 年 4 月 30 日に敷地内破碎帯の追加地質調査の報告書を取りまとめて、原子力規制委員会 (以下、「規制委員会」) に提出した。6 月 13 日には規制委員会の有識者事前会合が開催され、当機構は提出した報告書の要点について説明を行い、7 月 17 日-18 日、26 日-27 日の 2 回に分けて有識者による現地調査が行われ、8 月 26 日に第 1 回評価会合が開催された。評価会合での議論を踏まえ、9 月 25 日には規制委員会より更なる追加調査計画の策定の指示が発出され、当機構は 10 月 3 日に調査計画書を規制委員会に提出した。その後、当機構は 11 月 29 日に 11 月中旬までに得られた成果を「1 次とりまとめ報告」として規制委員会に提出し、平成 26 年 3 月中目途に「全体とりまとめ報告」を提出することとした。

追加調査の概要: 平成 25 年 9 月 25 日の規制委員会からの指示事項は、①もんじゅ敷地内断層の活動性を把握するため、剥ぎ取り調査地点の基盤岩中の断層において、変位マーカーの有無や形成年代の把握及び破碎帯内物質を対象とした年代測定等を実施すること、②もんじゅ敷地近傍の L-2 リニアメント及びその延長部等の評価についてデータ拡充を行うため、破碎帯の分布・性状、被覆層との関係及び被覆層の堆積年代 (14C 年代測定や火山灰分析等) の調査を実施すること、③活断層である白木-丹生断層周辺及び L-2 リニアメント延長等における海域の地質構造・活動性を把握するため、周辺海域における海上音波探査及び沿岸部における地形・地質調査等を実施すること、の大きく 3 点である。この指示事項を受ける形で調査計画を策定し、剥ぎ取り調査範囲を拡充しての追加調査や山地/段丘境界における詳細な地形・地質調査、沿岸海域での海上音波探査等を追加で実施した。

追加調査結果の概要: もんじゅ敷地のある敦賀半島北部の基盤岩類は白亜紀後期~古代三紀の江若 (こうじゃく) 花崗岩より構成される。敷地内破碎帯の性状調査では、原子炉建物基礎岩盤部で最長の α 破碎帯北方延長方向において、剥ぎ取り調査の範囲を拡充し、2 系統 (α 系、 β 系と呼ぶ) の複数の破碎帯の切断関係や変位量を把握し、 β 系よりも α 系が相対的に新しい構造であることを確認した。 α 系破碎帯は左横ずれセンスの幅数 cm の粘土脈で、幅は不規則に変化し粘土細脈が網目状に入っている。また、 α 系破碎帯により変位を被る玄武岩岩脈の K-Ar 年代は約 19Ma であった。この他、花崗岩や破碎帯内物質のジルコンやアパタイトを対象に FT 法や U-Pb 法による年代測定を実施し、花崗岩と破碎帯の熱史を検討した。これまでの調査結果からは、平成 25 年 4 月末のとりまとめ報告の結果と同様に、敷地内破碎帯が活動的であることを示す証拠は乏しく、これら破碎帯は、花崗岩が削剥により浅部に到達する以前に深部の熱水環境下で形成された小規模な古い地質構造である可能性が高い。山地/段丘境界における地形・地質調査では、境界付近に沿った走向の破碎帯は確認されず、花崗岩を覆う堆積層の火山灰分析と 14C 年代測定から、一部の露頭で約 4~5 万年前の堆積物の分布が確認できた。沿岸海域での海上音波探査では、平成 25 年 12 月に海底地形調査と合わせて実施し、データの解析を進めている。なお、既存の音波探査記録の各種データ処理を行った結果、既往検討結果の修正を要するような新たな情報は認められなかった。

今後の予定: 「全体とりまとめ報告」の提出以降も、敷地内の地質・地盤に係る情報蓄積やこれまでの調査結果の信頼性を更に高めるため、自主的な調査を継続する。また、上載地層法が適用できない断層破碎帯の活動性の評価手法等に関する基礎的研究を継続する。

キーワード: 高速増殖原型炉もんじゅ, 破碎帯調査, 江若花崗岩, 原子力規制委員会

Keywords: fast breeder reactor Monju, survey of crush zone, Kojyaku granite, Nuclear Regulation Authority

高速増殖原型炉もんじゅ敷地周辺の直線的な地形等に関する調査 The linearity of geographical features and a planation surface along the seashore around the fast breeder reactor Monju

佐々木 亮道^{1*}; 安江 健一¹; 島田 耕史¹; 立石 良²; 石丸 恒存¹; 田中 遊雲¹
SASAKI, Akimichi^{1*}; YASUE, Ken-ichi¹; SHIMADA, Koji¹; TATEISHI, Ryo²; ISHIMARU, Tsuneari¹; TANAKA, Yukumo¹

¹ (独) 日本原子力研究開発機構, ² 応用地質株式会社

¹ Japan Atomic Energy Agency, ² OYO Corporation

高速増殖原型炉もんじゅ (以下、もんじゅ) においては、原子炉建物近傍の敷地内破砕帯調査のほかに、段丘編年やリニアメントの成因検討等、敷地周辺の地形に着目した調査も行ってきた。本発表では、もんじゅ敷地周辺の直線的な地形や海岸沿いの平坦面を対象とした地形・地質調査の結果を報告する。

1. 直線的な山地/段丘境界に関する調査・検討

もんじゅ敷地の南方に存在する、NW~NNW方向の線状地形 (L-2 リニアメント, 耐震バックチェック時に判読) は、JAEAによる地形・地質調査の結果等から、組織地形である可能性が高いと評価されている。この線状地形の北方の山地/段丘境界はNW方向で直線的である。この境界の活断層の可能性について、原子力規制委員会の有識者会合において意見があり、これを受けて、詳細な地形・地質調査を行った。

地形調査: 山地/段丘境界付近において、地形判読、現地調査、測量データの解析等を行った。調査地域では、山地斜面が直接海に臨み、現河床と段丘面の勾配は比較的急である。そのため、人工改変前の地形図からは、河川が大きく蛇行することなくゆるく湾曲した侵食地形を作っていること、山地/段丘境界も同様にゆるく湾曲していることが読み取れる。また、建設前の地形図には山地/段丘境界付近に分離小丘状の地形が表現されているが、航空レーザ測量及び踏査ではそのような地形は顕著に認められないことから、地形図作成当時の判読誤差等が影響して表現されている可能性がある。

地質調査: 山地/段丘境界付近において、破砕帯の有無や節理の発達様式に着目して露頭調査と堆積層の年代測定を行った。その結果、発達する節理は主としてNW方向 (山地/段丘境界の発達方向) 及びNE方向であり、比較的堅硬な花崗岩も分布していることが明らかとなった。また、山地/段丘境界付近には一部の露頭で破砕帯が確認されたが、山地/段丘境界の方向と同方向に連続する破砕帯は確認されなかった。破砕帯が確認された山地/段丘境界北西端付近の露頭では、破砕帯を覆う約4~5万年前以降の被覆層に変位は確認されなかった。

以上の地形・地質調査の結果、山地/段丘境界の直線性が断層変位に起因する証拠は確認されなかった。

2. 直線的な海岸線と海岸沿いの平坦面に関する調査・検討

もんじゅ敷地周辺では、大局的にみるとNE方向の直線的な海岸線が発達する。また、海岸沿いの一部に定高性のある地形 (平坦面) が認められる。このような地形の成因と平坦面が他にも分布するのかどうかについて、地形・地質調査を行った。

地形調査: 地形判読を行うとともに、航空レーザ測量データから作成したDEMを利用して等高線図や地形断面図を作成した。その結果、標高5m付近に分布する平坦面 (幅約10m、長さ約20m) の1か所を除き、比較的平坦な面として認識できるような地形は判読されなかった。

地質調査: 節理の発達に着目した露頭調査と、離水を示唆する痕跡の探索を行った。その結果、海岸線と節理の発達方向 (NE方向) が調和的であることを確認した。また、離水を示唆する生物遺骸は確認されなかった。

キーワード: 高速増殖炉もんじゅ, 破砕帯調査, リニアメント

Keywords: fast breeder reactor Monju, survey of crush zone, lineament

破碎帯の新旧評価について—高速増殖原型炉もんじゅ敷地の花崗岩体の事例— On the turn determination of crush zone activity, a lesson from granitic basement rock holding the fast breeder reactor

島田 耕史^{1*}; 立石 良²; 石丸 恒存¹; 佐々木 亮道¹; 田中 遊雲¹; 宮崎 真之¹; 安江 健一¹; 丹羽 正和¹; 末岡 茂¹; 梅田 浩司¹; 池田 真輝典¹

SHIMADA, Koji^{1*}; TATEISHI, Ryo²; ISHIMARU, Tsuneari¹; SASAKI, Akimichi¹; TANAKA, Yukumo¹; MIYAZAKI, Masashi¹; YASUE, Ken-ichi¹; NIWA, Masakazu¹; SUEOKA, Shigeru¹; UMEDA, Koji¹; IKEDA, Makinori¹

¹ 日本原子力研究開発機構, ² 応用地質株式会社

¹ Japan Atomic Energy Agency, ² OYO Co.

原子炉施設の耐震安全性評価や放射性廃棄物の地層処分に際して岩盤中の破碎帯の活動性評価は重要な課題であり、その実施に当たっては活動性評価対象の妥当性が担保されるべきである。すなわち、破碎帯の新旧評価により、活動時期を評価すべき対象を絞り込むことが必要と考えられる。ここでは破碎帯とその他の地質体及び破碎帯同士の新旧評価の考え方を整理し、高速増殖原型炉もんじゅ（以下、「もんじゅ」）敷地における花崗岩（江若花崗岩；ジルコンU-Pb法による年代は $68.5 \pm 0.7\text{Ma}$ ）の破碎帯調査をその適用事例として示す。

1. 破碎帯とその他の地質体による新旧評価：

(1. 1) 上載地層による新旧評価；基盤岩中の破碎帯を覆う変位変形を受けていない上載地層の年代特定により、破碎帯の活動がその年代よりも古いことが示される。離れた破碎帯同士の新旧関係は、年代の同じ地層に対する影響の与え方の差異があった場合に評価できる。トレンチ調査（及び火山灰分析）によれば、敷地近傍の活断層である白木-丹生断層はA T火山灰層を含む上載層を切って繰り返し活動している。一方、もんじゅ建設時の敷地内破碎帯トレンチ調査によれば敷地内破碎帯はA T火山灰層を含む上載層を切っていない。これらから、最新活動は敷地内破碎帯の方が白木-丹生断層よりも古いことと、約3万年前以降の白木-丹生断層の活動時に敷地内の当該破碎帯が動かなかったことが示されている。

(1. 2) 岩脈・鉍物脈・粘土脈による新旧評価；破碎帯を横切る岩脈・鉍物脈・粘土脈が破碎帯による変位変形を受けていない時、破碎帯の最新活動はこれらの構造形成よりも古いことが示され、これらの構造の年代が与えられれば破碎帯の最新活動年代を評価することができる。もんじゅ敷地内の剥ぎ取り調査では、約19Maの玄武岩岩脈を切る α -3破碎帯、 α -4破碎帯が確認されており、最新活動年代は岩脈形成よりも後である。

2. 破碎帯同士の関係による新旧評価：

破碎帯同士の切断関係により、切られた方は切った方よりも古い。共役の関係が変位センスから示唆された場合には同時期の形成が考慮されるが、最終的に切っている方が最新活動によるものであろう。共役関係は、Griffith-Coulomb破壊基準、Maximum Effective Moment 破壊基準⁽¹⁾により判断される。切っている構造が高温高圧下での形成を示す場合、過去、地下深部で形成されたことを示すので、切られた構造が変質による脆弱化、粘土化を被っている、古い地質構造と評価できる。もんじゅ敷地内の剥ぎ取り調査では、顕著な粘土脈を伴う β 破碎帯と、これを切る α -3系破碎帯があり、挟角 $50\sim 55^\circ$ で共役的に発達している。また、 α -3系の破碎帯は花崗岩の黒雲母の引きずりと珪長質部の引き伸ばしによるP-Y-R₁面形成を伴う面状カタクレーサイトや石英脈の引きずり褶曲が肉眼で認められ、延性的な変形であり、比較的高温高圧下における構造発達を示唆する。

以上から、玄武岩を切り、 β 破碎帯を切る α -3系の破碎帯が、活動時期を評価すべき対象として絞り込まれており、会場では検討結果を示す。

(1) Zheng et al., 2004, Journal of Structural Geology, 26, 271-285.

キーワード: 高速増殖原型炉もんじゅ, 破碎帯調査, 江若花崗岩

Keywords: fast breeder reactor Monju, survey of crush zone, Kojaku granite

1999 年台湾集集地震に伴う地下水位変化の深さによる依存性 Depth-dependent coseismic groundwater level changes by seismic ground motion of the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan

比嘉 万友美^{1*}; 中村 衛²; 小泉 尚嗣³; 頼 文基⁴
HIGA, Mayumi^{1*}; NAKAMURA, Mamoru²; KOIZUMI, Naoji³; LAI, Wen-chi⁴

¹ 琉球大学大学院理工学研究科, ² 琉球大学理学部, ³ 産業技術総合研究所地質調査総合センター, ⁴ 台湾成功大学防災センター

¹ Faculty of Science and Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus, ² Faculty of Science, University of the Ryukyus, ³ Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, ⁴ Disaster Prevention Research Center, National Cheng Kung University, Taiwan

地震時に地下水位や水圧が変動する現象がこれまで数多く報告されてきた (Montgomery and Manga, 2003; 小泉, 2013)。地震時地下水位変動の要因として、静的体積歪変化および地殻変動 (動的体積歪変化や透水性変化・液状化等) が考えられている (Lee *et al.*, 2002; Lai *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2001)。静的体積歪変化は地震時水位変化との対応が良い場合が多く報告されていることから (例えば、小泉, 2013)、地震時水位変化の主要因の 1 つであると考えられている。しかし、静的体積歪変化と水位変化が対応しないことも多い。この場合は、地震動の影響が大きいとされる場合が多い (例えば、小泉, 2013)、その詳細は明らかになっていない。

集集地震 (Mw7.6) は 1999 年 9 月 21 日午前 1 時 47 分 (現地時刻) に台湾中部で発生した。内陸直下で起こる地震としては最大級のものであったことに加え、断層周辺には高密度の強震動観測網 (Lee *et al.*, 1999) と地下水資源管理用の観測井戸が多数展開されていたため (小泉, 2011)、良好な地震波形データとともに多数の地震時の地下水位変化のデータが震源域近傍で得られている。

集集地震での地下水位変化に関して、Wang *et al.* (2003) では震源域近くの沖積平野部分の比較的浅い地下水において、液状化の観点から地下水位変化量と加速度応答スペクトルおよび速度応答スペクトルとの間に強い相関関係があることを示している。しかし、彼らの研究では多くの井戸をまとめて解析し地震動にのみ注目する一方、帯水層毎の特徴や透水性の影響等について、必ずしも十分検討されてはいない。液状化は、地震動だけで決まるものではなく、地下水の水文地質的条件 (不圧か被圧といった帯水層の性質や透水性等) にも左右されるため、後者についても十分な検討が必要と考えられる。

そこで、我々は水文地質条件が同じと考えられる帯水層毎に地震時の地下水位変化を調べた。不圧帯水層である最も浅い帯水層 1 とその下の被圧帯水層である帯水層 2 の地下水を対象とし、異なる性質があるのか調査した。これらの井戸では、水位上昇した井戸 (84 本) と低下した井戸 (14 本) の両方がみられたが、水位低下に関しては地下水位変化のメカニズムが異なると考えられるため、本研究では沖積平野部分の水位上昇した井戸のデータのみを使用した。また、通常のスペクトルに比べて応答スペクトルは地盤への影響を読み取ることができるため、地震波の応答スペクトルと地下水位変化量との関係を調べた。その際、異なる周波数の応答スペクトルに対する地下水位変化をみるため、高周波側 (1Hz) と低周波側 (0.1Hz) に分けて計算した。元となる加速度地震波形のデータから、加速度応答スペクトル・速度応答スペクトル・変位応答スペクトルを上下動成分・水平動成分・3 成分合成のそれぞれで計算している。帯水層ごとに応答スペクトルと水位変化量との相関係数を出したところ、帯水層によって応答する周波数帯が異なるという結果が得られた。不圧帯水層と考えられる帯水層 1 では高周波側 (1Hz) において水位変化と応答スペクトルとの相関が良かったが、被圧と考えられる帯水層 2 では低周波 (0.1Hz) において相関が良くなった。また、両帯水層に共通して透水係数と水位変化量は強い正の相関が見られた。

キーワード: 地下水位変化, 1999 年台湾集集地震, 地震動

Keywords: Groundwater level changes, The 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan, Seismic ground motion

幌延深地層研究計画の350m調査坑道における断層と水みちの産状 Occurrence of faults and water conducting features at 350m gallery of the Horonobe URL project

早野 明^{1*}; 松岡 稔幸¹; 石井 英一¹
HAYANO, Akira^{1*}; MATSUOKA, Toshiyuki¹; ISHII, Eiichi¹

¹ 独立行政法人日本原子力研究開発機構
¹ Japan Atomic Energy Agency

1. はじめに

日本原子力研究開発機構は、幌延深地層研究計画において堆積岩を対象とした水理地質構造の調査評価技術の開発を行っている。2014年1月までに深度350mに総延長約740mの水平な調査坑道（以下、350m調査坑道）が掘削された。本発表では、地上からの調査に基づく水みちになりうる地質構造の分布の予測を踏まえ、350m調査坑道において行われた坑道壁面の地質観察の結果に基づいて断層や節理などの地質構造の特徴を示す。

2. 地上からの調査に基づく350m調査坑道の水みちに関連する断層の分布の予測

これまでに行った地上からの調査により構築された地質構造モデルに基づく、350m調査坑道には新第三紀の珪質泥岩を主体とする稚内層が分布する。また、350m調査坑道は北北西方向の背斜構造の西翼部に位置し、層理面の方向は、北西走向で40度程度南西に傾斜する。350m調査坑道には、地質図スケールの大規模な断層は分布せず、確率論的に取り扱われる小断層として、層理面に高角な横ずれが卓越する断層（以下、高角断層）と層理面にほぼ平行な縦ずれが卓越する断層（以下、層面断層）が分布する。250m調査坑道などの過去の観察結果から、高角断層は、雁行状に配列したスプレークラックを伴い、それにより連結して主要な水みちとなる小断層帯を形成する概念モデルが示されている。一方、層面断層が水みちとして機能している可能性は低いと考えられている。それらの既存情報を踏まえて、350m調査坑道の湧水箇所を予測するため、近傍の地上からのボーリング孔において実測された高角断層の方向と、その断層幅から推定した断層の大きさに基づき高角断層の分布を推定した。その結果、北東-南西走向または東-西走向を有する19条の高角断層が抽出され、そのうち、6条が350m調査坑道と交差すると推定された。特に、最も規模の大きい高角断層（以下、F1断層）は、北東-南西走向を有し、350m調査坑道の領域の中央部を通過して北東側の坑道を横断すると推定された。

3. 坑道壁面の地質観察結果に基づく350m調査坑道に分布する断層の特徴

350m調査坑道における地質観察では、いくつかの高角断層が観察された。これらの位置や方向は、地上からの調査に基づく予測結果とおおよそ整合的である。また、少なくとも7条の連続性の良い層面断層が観察された。ほとんどの場合、高角断層は層面断層を変位させている。F1断層は、予測の通り350m調査坑道の南西側から中央部付近にかけて観察された。一方、350m調査坑道の北東側では、F1断層は観察されず、層面断層の一つである最大30cm程度の幅の断層角礫ないし断層粘土を介する断層（以下、S1断層）が観察された。350m調査坑道では、掘削前にグラウト工を実施したため、本来の湧水状況を観察することはできないが、予測の通り、ほとんどの高角断層近傍において湧水が認められた。特に、層面断層との交差部近傍では比較的湧水が多い傾向が認められた。一方、層面断層であるS1断層近傍の北東側の坑道においても大量の湧水が発生し、追加のグラウト工を行っている。350m調査坑道の地質調査の結果、掘削前に注入されたグラウト材は、断層岩を介する断層そのものよりむしろ断層近傍に発達する節理に浸透する傾向がみられ、S1断層近傍の産状も同様である。このことから、断層そのものよりむしろその近傍で発達する節理がより主要な水みちとして寄与している可能性が示唆される。

4. 今後の課題

350m調査坑道の掘削時に実施された坑道壁面地質観察のデータは、地上からの調査に基づく水理地質構造モデルの妥当性確認に用いられる。また、地下施設建設における実施設計の妥当性確認のための基礎データとしても活用できる。今後、詳細なスケールでのモデル化を行う際には、断層近傍で発達する節理の水みちへの寄与を考慮し、さらには高角断層と層面断層の関係を踏まえた概念モデルの更新が重要となる。

キーワード: 水理地質構造モデル, 断層, 水みち

Keywords: Hydrogeological model, Fault, Water-conducting feature

土岐花崗岩体における透水性変化と亀裂構造および変質作用との関係性 Permeability variation in Toki granite and its relationships with crack structure and alteration processes

久保 大樹^{1*}; 松田 典大¹; 柏谷 公希¹; 小池 克明¹
KUBO, Taiki^{1*}; MATSUDA, Norihiro¹; KASHIWAYA, Kouki¹; KOIKE, Katsuaki¹

¹ 京都大学大学院工学研究科
¹ Kyoto University

高レベル放射性廃棄物の地層処分を行う際には、地下処分施設を配置する岩体の詳細な物理的・化学的特性を把握することが不可欠となる。特に、流体の流動経路となる岩体中の高透水性ゾーンの抽出は重要な課題である。本研究では、岩体の透水性の空間的な変化と、それを支配する主な因子を明らかにするため、土岐花崗岩のボーリングコアを試料として浸透率測定を行った。ボーリングコアから円盤状供試体および薄片を作製し、画像解析による亀裂の定量化を行った。さらに、肉眼的に変質程度が異なるボーリングコアを試料として、蛍光 X 線分析 (XRF) を行い、化学組成から推定される岩石の変質程度と浸透率の関係について検討した。

まず、花崗岩体中の深度範囲 1 km にわたる透水性変化を明らかにするため、窒素ガス圧入式パーミアメーターを用いた浸透率測定を行った。試料は日本原子力研究開発機構 (JAEA) によって東濃地域 (岐阜県瑞浪市) で掘削されたボーリングコアである。深度範囲 100~1000 m から 25 m 間隔で計 40 個以上の花崗岩コアを採取し、浸透率を測定した。特に浸透率の高い試料では、コアの外周部で 16 方位の浸透率を測定し、異方性の有無について検討した。

ボーリングコアの浸透率は、変質帯や断層帯のボーリングコアで大きい傾向が認められた。これら劣化部では岩石中の空隙や亀裂が増加し、浸透率測定においてガスが流動するパスが形成されるためと考えられる。また、断層帯付近における浸透率は東西方向で大きいことが明らかとなった。浸透率が大きい方向は断層の走向と調和的であり、浸透率の異方性を形成する要因として断層運動に伴う亀裂の発達が推定された。

次に、亀裂と浸透率の関係を明確にするため、画像解析により亀裂特性を定量化し浸透率と比較した。試料は JAEA の MIZ-1 号孔で採取された花崗岩コアである。本コアは、コア軸と斜交する割れ目により分断されており、割れ目からの距離が異なるコア軸に垂直な 6 つの面で 16 方位の浸透率測定を実施した。その上で、亀裂部分に蛍光樹脂を含浸させた円盤状供試体を作製し、蛍光スキャナでメソクラック解析用画像を取得した。さらに、円盤状供試体から薄片を作製し、実体顕微鏡を用いてマイクロクラック解析用画像を取得した。これらの画像から亀裂を抽出し、交差している亀裂は交差点で分割した上で亀裂の長さや方位を求めた。

各測定位置における浸透率の平均値は、割れ目に近いほど大きいことが明らかとなった。また、メソクラックで認められた配向性は、浸透率が大きい方位と調和的であった。さらに、解析画像におけるマイクロクラックの累計長さや浸透率の間には正の相関が確認された。以上から、亀裂が浸透率の異方性を支配しており、マイクロクラックは浸透率の大きさを規定する重要な因子であることが示唆された。

また、変質プロセスと花崗岩の浸透率との関係について検討するため、肉眼的に性状の異なるボーリングコアを対象に蛍光 X 線分析 (XRF) を行い、化学組成から推定される岩石の変質状態と浸透率の関係について考察した。XRF から、Ca 濃度と浸透率に概ね正の相関が存在することが確認された。既往の研究により、土岐花崗岩については、(1) 黒雲母の緑泥石化、(2) 斜長石のイライト化、(3) 方解石の沈殿という熱水変質プロセスが考えられている (Nishimoto and Yoshida, 2010)。斜長石のイライト化の過程で Ca の沈殿が生じるため、Ca 濃度が比較的高い変質帯や割れ目帯は熱水変質が顕著に進んだことが示唆された。すなわち、変質帯と割れ目帯は高透水性であり、過去に熱水の流動経路として機能したものと考えられた。一方、断層帯の試料は高い浸透率を示すが、Ca 濃度は比較的低いことが明らかとなった。その理由として、破碎の進行に伴い浸透率が増大するが、不透水性の断層ガウジが形成されることで、流体の移動に伴う Ca の付加が生じにくいことが考えられる。

以上から、岩体内においては、亀裂面周辺の微小亀裂が集中する領域や変質帯なども、地下水流動経路として機能する可能性が考えられた。より高精度な地下水理構造の推定を行うためには、こうした高透水性領域の分布を把握する必要がある。

謝辞：解析のためのデータをはじめ、解析方法と結果に関して種々ご教示・討議いただいた (独) 日本原子力研究開発機構の研究者諸氏に深甚の謝意を表したい。

引用文献

Nishimoto, S., Yoshida, H. (2010): Hydrothermal alteration of deep fractured granite: Effects of dissolution and precipitation, *Lithos*, vol. 115, pp. 153-162.

HCG36-P05

会場:3 階ポスター会場

時間:4 月 29 日 18:15-19:30

キーワード: 亀裂構造, 浸透率, マイクロクラック, 変質帯, 地下水理構造, 土岐花崗岩

Keywords: fracture system, permeability, microcrack, altered zone, hydrogeological structure, Toki granite

地中レーダにより推定した森林土壌の分布と放射性セシウムの深度分布の関連性 The relation between imaging of soil structure with GPR and depth profile of radioactive cesium

渡辺 貴善^{1*}; 三田地 勝昭¹; 阿部 寛信¹; 新里 忠史¹
WATANABE, Takayoshi^{1*}; MITACHI, Katsuaki¹; ABE, Hironobu¹; NIIZATO, Tadafumi¹

¹ 日本原子力研究開発機構
¹ Japan Atomic Energy Agency

東京電力福島第一原子力発電所事故により放出された放射性セシウムは、山林や市街地に降下した。市街地では環境省・地方自治体により除染活動により空間線量率の低減が進められている。これに対して、生活圏から離れた森林においては除染に関わる試験が行われている段階である。未除染の森林域から隣接した生活圏に放射性セシウムが移動することにより、生活圏での空間線量率の空間分布や時間的な変化を引き起こす可能性が考えられる。日本原子力研究開発機構では「福島長期環境動態研究プロジェクト」(以下、F-TRACE プロジェクト)を2012年11月に開始し、現時点における放射性セシウムの分布状況とともに、森林域から流出する放射性セシウムが生活圏や河川、河口域へと移動する状況を明らかにし、それらを踏まえた放射性セシウムの空間的及び時間的な変化に係る将来予測と移動抑制対策の提案を目的とした研究を行っている。

現時点において放射性セシウムの主な供給源である森林域では、放射性セシウムは雨水の浸透に伴い土壌中を深度方向へ移動するだけでなく、落ち葉や土壌に付着し表面流により森林内を水平方向に移動すると考えられる。これらの移動現象は気象条件、植生、地形及び土壌条件により異なることが予想される。そのため、F-TRACE プロジェクトの森林調査では、それら条件が異なる川内村下川内地区(常緑針葉樹林、褐色森林土)と川俣町山木屋地区(落葉広葉樹林、真砂土及び褐色森林土)を調査地点に選定し、2012年12月から植生や土壌断面、空間線量率等の現地調査、採取した落ち葉と土壌に含まれる放射性セシウムの分析を進めている。本論では、放射性セシウムの移動現象に係る諸条件のうち森林内の土壌分布について、地中レーダ探査、貫入式土壌硬度計データ及び現地での土壌断面調査から推定される結果とともに、深度方向における放射性セシウム分布との関連性について報告する。

地中レーダ探査は、10 MHz から 1 GHz 程度の電磁波を送信アンテナから地中に向けて放射し、地下で反射した電磁波を地上の受信アンテナで検出することにより、地下浅部の構造、すなわち土壌分布を推定する手法である(物理探査学会, 1999)。地下に放射された電磁波は、導電率や誘電率等の電気特性が異なる境界、具体的には地下の空洞、埋設物、亀裂、土壌・地層境界の上面及び地下水面などで強い反射を示す。このため、土壌ごとに構成鉱物や間隙率、水分量等の物質移動に係る諸特性が異なれば、本探査によりそれらの地下での分布を検出することができると期待される。特に、周波数の高い送信アンテナを使用した場合には、地下深部の情報は得られないが、地下浅部の詳細な情報を得ることができる。

本研究では、土壌分布の概要を把握するために 100 MHz のアンテナを使用し、空洞等の地下浅部の構造を把握するために 500 MHz のアンテナを使用し地中レーダ探査を行った。森林内の土壌分布は、大まかには尾根や谷、斜面などの地形に依存することが知られている(塚本, 1992 など)。このため本探査では、森林内の谷地形に沿う測線および等高線に沿う測線を設定した。土壌硬度計による貫入試験及び土壌採取で成形された土壌断面の調査は、地中レーダ探査の測線に沿って実施した。

文献

物理探査学会編, 1999, 物理探査ハンドブック, 東京.
塚本良則, 1992, 森林水文学, p.319, 文永堂出版, 東京.

キーワード: 地中レーダ, 放射性セシウムの深度分布, F-TRACE プロジェクト
Keywords: ground penetrating radar, depth profile of radioactive cesium, F-TRACE project

ベントナイトのメチレンブルー吸着量測定法の現状と改良 Current situation and improvement of methylene blue adsorption testing method for bentonite

堀内 悠^{1*}; 三好 陽子¹; 高木 哲一¹
HORIUCHI, Yu^{1*}; MIYOSHI, Youko¹; TAKAGI, Tetsuichi¹

¹ 産業技術総合研究所
¹ Geological Survey of Japan

1. はじめに

ベントナイトのメチレンブルー吸着量測定法は、従来日本ベントナイト工業会による JBAS107-77 および JBAS107-91 などが用いられているが、現行の測定法にはあいまいな部分が多く、測定者の経験や判断に頼るところの大きい試験法であるため、主にベントナイトを扱う各企業内での基準に従い品質管理の目安とする目的で使用されてきた。しかし、現在、廃棄物処分場等の安全性の確保が求められる分野でベントナイトの需要が増えてきたことなどから、公に示すことのできる正確な測定が求められている。本研究では従来の測定法に代り、再現性のある新たな測定法を提案することを目標とし、現状の調査を行った。

2. 調査結果

2013 年秋から 2014 年 1 月末現在までに、ベントナイトを扱う一般企業等 13 社に対してメチレンブルー吸着量測定法の現状を取材し、現在行っている測定法の詳細についてアンケートを行った。アンケートの結果、現在メチレンブルー吸着量測定を行っている企業が 10 社、そのうち JBAS の手法に則った手法での測定は 8 社で行われていた。また、比色法など、JBAS で規定されていない独自の手法を用いている企業は、JBAS の手法との複合手法を行っている 2 社を含め 4 社であった。従来法の JBAS にしたがった測定では、試薬の作成、試料の乾燥時間および終点の判定方法などの点で、企業によるばらつきと工夫がみられた。また、比色法等の手法を行っている理由として、終点を数値で判断できる・短時間で測定ができるといったことが挙げられた。

3. 考察

試験方法でばらつきや工夫がみられた部分は、従来法で規定のあいまいであった点・手間のかかる点に多くみられ、各企業が試験法のあいまいさを回避するとともに迅速な手法を検討したことがうかがわれた。しかし、試験法の改善を行って以来 20 年ほど経つこともあり、工夫の経緯については不明な企業も多い。このことから、従来法を改善し新たな試験法を提案するよい機会であると考えられる。また、各企業にみられる独自の工夫は、最大限に時間と費用を節約する内容のものが多く、消耗品の使用を抑えたとともに、一秒でも時間短縮し効率化しようとする傾向がみられた。

4. 結論と課題

本研究で提案を目指す測定法は、従来法のあいまいさをなくすこととともに費用のかからない迅速な手法であることが求められる。また同時に、廃棄物処分等で安全性の確保が求められる場合でも十分な精度が得られるような試験法である必要がある。今後、メチレンブルーが吸着平衡に至る時間や、ベントナイトの産地による分散・吸着特性の違いなどを検討する予定である。

キーワード: ベントナイト
Keywords: bentonite