

断層とその水理特性に係る地上からの調査・評価に関する技術

吉村公孝*1

断層は破砕部が地下水の流動経路となる透水性の高い性状を示すことがあるため、特定放射性廃棄物の地層処分において、天然バリアの放射性核種の移行抑制などの観点から、断層の水理特性を把握することは重要である。この断層の水理特性を把握するための体系的な調査・評価技術を構築することを目的として、現地調査を含む実証試験を実施した。実際の現地調査に先立ち、断層の地下水流動に対する影響を評価する一連の調査フローを作成して、調査の対象と目標を整理した。この調査フローに沿って現地調査を実施し、断層の水理特性は断層運動に伴う地層の破碎と断層ガウジの影響から水理特性は異方性を示し、大局的には調査エリアの水理境界を形成する遮水性の水理特性を示す結果が得られた。これまでの調査結果から、現地調査開始前に作成した調査フローが有効であることを確認し、概要調査において、断層の水理特性の調査・評価を行う際に必要な知見を取得することができた。

Keywords: 特定放射性廃棄物, 断層, 水理特性, 水理地質構造モデル, 概要調査

Fault planes can be a hydrogeological boundary sealing groundwater and/or a conductive surface. It becomes important to evaluate its hydrogeological characteristics for natural barrier's role from inhibiting radionuclide migration point, in the area of geological disposal of radioactive waste. A series of investigation flow was constructed to set a scope for investigating hydrogeological characteristics of fault plains before starting a field campaign. The field campaign was conducted along the flow. The investigation results of the fault indicate hydraulic heterogeneity by the effect of permeable breccias and impermeable gouge. The fault plane might also indicate hydraulic boundary at the survey area. The result shows that the flow constructed before field campaign works effective to evaluate the hydrogeological profile of the fault plane. Knowledge for evaluating hydrogeological characteristics of fault plane is obtained to conduct field investigation properly in the preliminary investigation stage.

Keywords: radioactive waste, fault, hydrogeological characteristics, model construction, preliminary investigation

1 はじめに

原子力発電の使用済燃料を再処理する過程で生じる高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物は、わが国では、地下 300m より深い地層中に最終処分施設を建設して地層処分を行う計画である。原子力発電環境整備機構 (NUMO) は、最終処分施設の建設地を選定するために、文献調査、概要調査、精密調査の 3 段階の調査段階を経て、火山活動、断層活動、隆起・侵食などの自然現象による地層の著しい変動の生じる場所を回避したうえで、設計・施工や閉鎖後長期の安全性の観点からより適切な地質環境特性 (地下水流動特性、地下水化学特性、岩盤力学・熱特性、物質移行特性など) を有する場所を選定する[1]。

わが国の地層や岩盤に普遍的に確認される断層は、過去の断層運動によって破碎された断層破砕部を有し、ときにその破砕部が地下水の流動経路となる透水性の高い性状を示すことがある[2]。そのため、天然バリアの放射性核種の移行抑制などの観点から、断層の水理特性を把握することは、地層処分の長期安全性の観点から重要である。具体的には調査エリアに断層が存在する場合には、その水理特性を把握し、天然バリア中の放射性核種の移行に対する影響を把握しておくことが求められる。このような背景を踏まえて、断層の水理特性を把握するための個別調査技術を組み合わせた体系的な調査技術を構築することを目的とした現地調査を含む実証試験を行った。ここではその概要を紹介する。

2 断層の水理特性調査の考え方

Technology for investigating faults from the surface to estimate hydrogeological characteristics by Kimitaka YOSHIMURA (kyoshimura@numo.or.jp)

*1 原子力発電環境整備機構 技術部

Nuclear Waste Management Organization of Japan (NUMO)

〒108-0014 東京都港区芝 4-1-23 三田 NN ビル 2 階

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第 31 回夏期セミナーにおける講演内容に加筆したものである。

現地調査を開始する前に、断層の水理特性に関する調査方法について机上検討を行い、断層の地下水流動に対する影響を評価する一連の調査フロー (Fig. 1) を作成して、調査の対象と目標を整理した。ここでは調査を地表からの調査段階とボーリング調査段階に分割した[3]。

調査の前半は断層の抽出を目標とする。ここではトレンチ調査や地形調査などの活断層調査および水文調査、地下水分析などの地表調査を実施する。また併せて断層の地質特性に関するデータを取得する。調査結果に基づいて、地層と断層の透水性を推定して水理地質構造モデルを作成し、地下水流動解析から水圧分布や地下水の流動方向を把握する。

調査の後半では断層の水理的影響の評価を目標とする。ボーリング調査により、断層および断層周辺岩盤の分布状況や性状、断層の詳細な規模、形状、断層ガウジや破砕状況などの断層の内部構造、発達過程などに関するデータを取得する。併せて、ボーリング孔を利用した水理試験、地下水の水圧モニタリングおよび地下水採取等を行い、断層および周辺岩盤の透水性や地下水の水圧分布に関するデータ、採取した地下水から地下水の水質形成過程や地下水年代に関するデータを取得する。これらのデータを基にして水理地質構造モデルを更新する。次に、作成した水理地質構造モデルを用いて地下水流動解析を行い、ボーリング調査等で取得したデータとの対比、地下水の水質形成過程や地下水年代に関するデータとの対比を行う。そして断層の水理特性に着目して構築した水理地質構造モデルの妥当性を確認する。

本検討では、この調査フローに沿って調査・評価を実施した結果に基づき、事前に作成した調査フローの妥当性を確認することとした。

3 地表調査のフェーズ

断層の水理特性把握に関する現地調査を実施する場所と

して、わが国の地質環境に類似した新生代の付加体堆積岩が分布するアメリカ合衆国の西海岸を選定した。現地調査は NUMO とローレンスバークレー国立研究所 (LBNL) との共同研究として実施し、LBNL 敷地内に分布する Wildcat 断層を調査対象とした。Wildcat 断層は、バークレー市内を北西から南東に連続して分布し、活断層である Heyward 断層に並行する右横ずれ変位を有する断層であるが、既往調査からは最近の活動性は確認されていない[4]。

現地調査を開始する前に、文献調査と空中写真判読を行い、断層分布に関連するリニアメントを抽出した。Wildcat 断層は、調査エリアの北部 (Fig. 2) では直線状であり、LBNL を含む南部では分岐している。リニアメントの明瞭さから活動性を推定した結果、活動性はほとんど認められず、

Wildcat 断層が断片状に分布する様子が確認された。

続いて、現地調査では、地質分布状況および断層露頭を確認するために地表踏査を行った。そして物理探査として反射法地震探査 3 測線 (測線長: 252~285m)、比抵抗電気探査 5 測線 (測線長: 250~480m) を行い、断層の位置を推定した[5]。さらに断層位置の推定結果を確認するために 5 か所でトレンチ調査を実施した。

これらの調査結果から、Wildcat 断層は、北西-南東に走向を有する全長 20~25km の右横ずれ断層で、低角度の断層 2 本とほぼ垂直の断層 1 本に分岐し、断層運動に伴う角れきの分布、断層ガウジおよびカタクレイサイト様の破砕構造を有することを確認した。なお、ここまでのデータからは活動性を示す証拠は得られなかった。

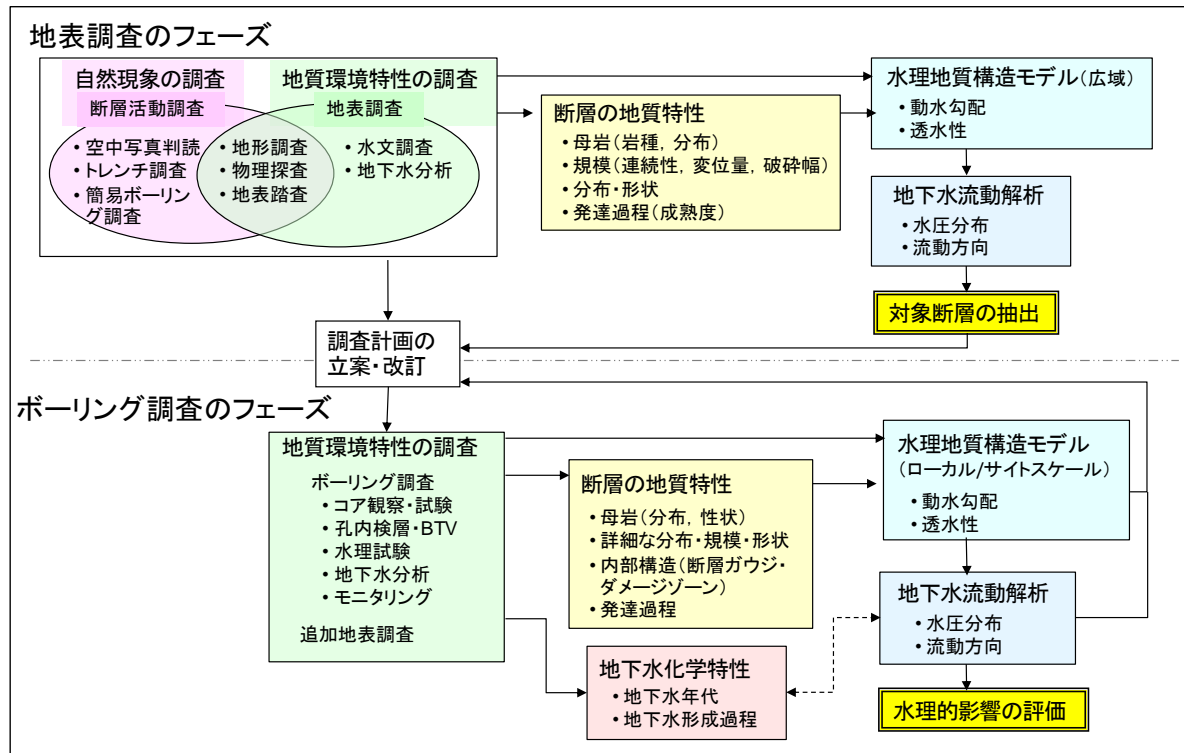


Fig. 1 Investigation flow to evaluate hydraulic characteristic of faults.

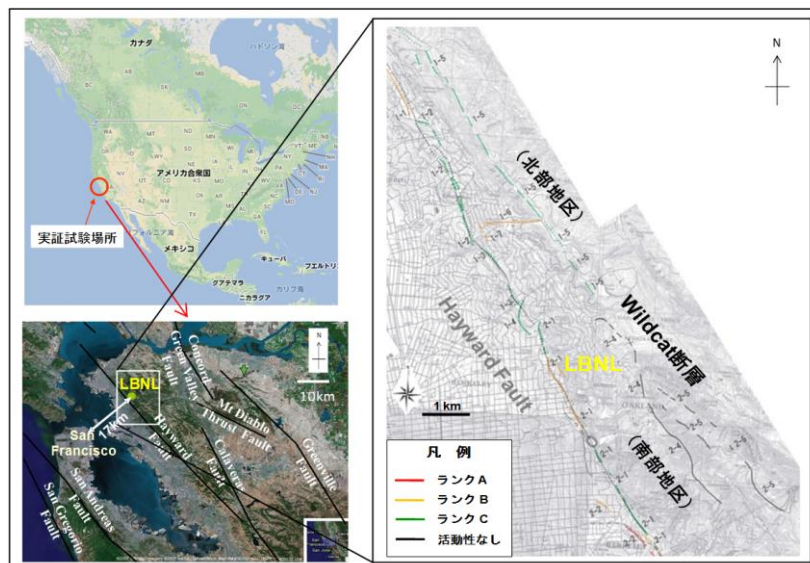


Fig. 2 Aero photo interpretation of distributed lineaments.

4 ボーリング調査のフェーズ

Fig. 3 に物理探査, トレンチ調査, ボーリング調査の位置を示す。ボーリング調査では, 3 孔の鉛直孔 (掘削長, WF-1 : 161m, WF-2 : 154m, WF-3 : 156m) と 2 孔の傾斜孔 (掘削長, WF-4 : 221m, WF-5 : 207m) を掘削し, コア観察, 孔壁観察, 物理検層, 流体検層, 水理試験, 地下水の採取・分析 (組成, 年代), 水圧モニタリングなどの調査・試験を実施した。調査の結果, Wildcat 断層と考えられる 4 個所の破碎構造を確認し, 4 つの断層をそれぞれ Fa, Fb, Fc, Fd とした[6]。

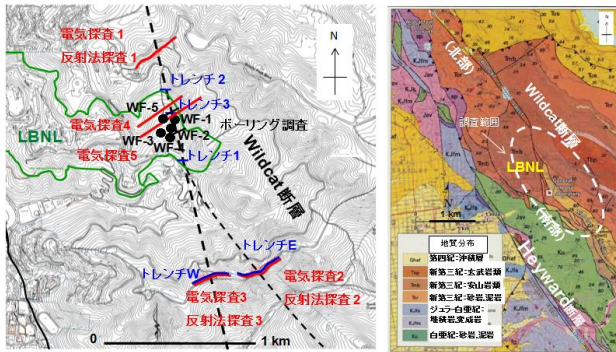


Fig. 3 Location of geophysical and trench survey and borehole investigation (left). Location of investigation area with dotted circle on the geological map (right).

断層部分のコア観察およびコアを使った CT スキャンにより断層内部構造を調査した結果, 断層部分は割れ目が発達していること, れき混じりの断層ガウジ帯とガウジ帯の上下に角れき帯が分布し, 一部ではカタクレサイト様の変形組織が分布していることを確認した。断層ガウジの部分は粘土化して間隙が詰まった様子が確認でき, 一方で角れき部分は割れ目が発達して間隙が広がる様子を确认した (Fig. 4)。この性状から断層ガウジ部分は透水性が低く, 一方で角れき部分は透水性が高いことが推察された。

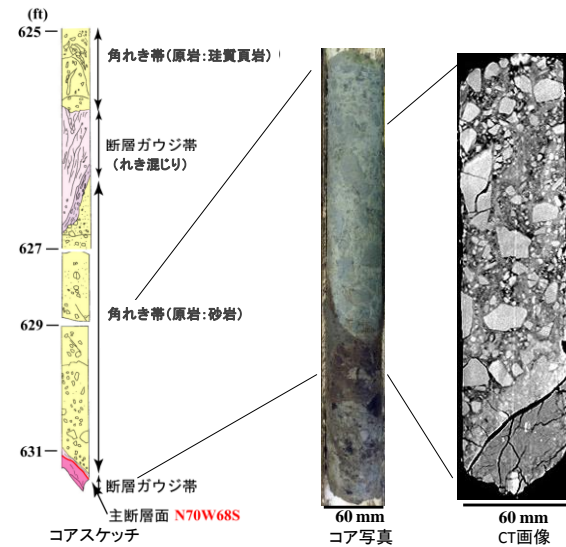


Fig. 4 An illustration, an optical photo and a CT photo from breccias zone with gouge in WF-5.

ボーリング孔内で実施した水理試験によって, 断層を含む区間の透水性が, 周辺岩盤より 2~3 オーダー高いことを確認した。断層を挟んだ 2 本のボーリング孔内で観測した水圧分布を比較した結果, LBNL 敷地の西側で掘削した 2 本のボーリング (WF-2, 3) と東側のボーリング (WF-1) は, 標高差が数 m であるのに対して, 20m 程度の水頭差が認められた (Fig. 5)。これは断層が遮水性の性状を有することが原因として考えられる。

ボーリング孔内で採取した地下水の放射性同位体と主成分分析を実施した[7]。主成分分析から, 上流に位置する WF-1, WF-5 から下流に向かって水質が Ca-HCO_3 型から Na-HCO_3 型に変化することを確認した (Fig. 6)。また, 断層付近で採取した地下水からは ^3H が確認できなかったことから, 地表水が断層破碎部を通じて地下に流入している可能性は少ない。 ^{14}C による地下水年代測定からは WF-1 で 4800 年および 6500 年, 下流の WF-2 および WF-4 で 7300 年および 7800 年を示し, 上流から下流にかけて数千年かけて流動しているものと考えられる。

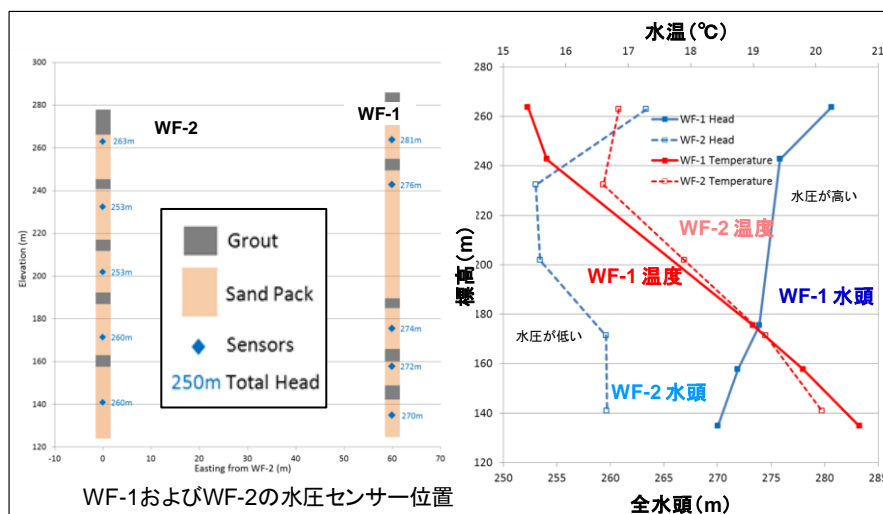
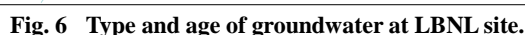


Fig. 5 Location of sensors for groundwater pressure measurement (left). Profile of groundwater temperature and hydraulic head in WF-1 and WF-2 (right).



これまでに述べた調査結果に基づいて水理地質構造モデルを作成した。モデルでは、水理試験および水圧観測の結果から Fd 断層中央部に断層ガウジの分布に伴う低透水構造、断層沿いの部分に 2~3 オーダー高い高透水構造を作成し (Fig. 7)、透水異方性を示す水理地質構造としてモデル化した[8]。

3D block diagram illustrating geological strata and faults. The strata are color-coded and labeled as follows:

- Moraga層 (Moraga Formation)
- Orinda層 (緩傾斜) (Orinda Formation, low dip)
- Orinda層 (急傾斜) (Orinda Formation, steep dip)
- Claremont層 (緩傾斜) (Claremont Formation, low dip)
- Claremont層 (急傾斜) (Claremont Formation, steep dip)
- Great Valley層群 (Great Valley Group)

The faults are labeled as follows:

- Fb
- Fc
- Fd

A scale bar indicates 500m. A legend shows a line segment labeled "断層" (Fault).

モデルから得られる水圧分布と、ボーリング孔内で観測した水圧分布を比較した結果、水圧観測で推定された遮水性の性状を示すことから (Fig 8), ここを挟んで水理的に隔離された場にあると推定した。以上のことから、Wildcat 断層は、横ずれ断層運動の結果、断層面方向に高透水性および断層直交方向に遮水性の透水異方性を有し、WF-1 と WF-2 間に分布すると考えられる Fd 断層を主断層とする断層帯を形成し、傾斜が異なる断層が複数存在するものと考

断層の水理特性を把握するための個別の調査技術を組み合わせた体系的な調査手法を構築することを目的に現地調査を含む実証試験を実施した。現地調査に先立ち、断層の水理特性を把握するための調査フローを作成し、それに沿ってさまざまな調査・評価技術を組み合わせ適用し、各技術の特徴を生かして相互補完しつつ総合的な解析を行うことで断層の水理特性の推定に至るまでの成果を出すことができた。この検討を通じて、現地調査開始前に作成した調査フローが有効であることを確認し、今後の概要調査に

において、断層の水理特性の調査・評価を行う際に必要な知見を取得することができたものとする。

謝辞

本稿の作成に当たり、原子力発電環境整備機構の後藤淳一氏のご協力を賜った。また、現地調査の実施および取りまとめに当たりローレンスバークレー国立研究所の唐崎建二博士のご協力を賜った。紙面を借りてここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010 年度版）－確かな技術による安全な地層処分の実現のために。NUMO-TR-11-01 (2011).
- [2] 石井英一，安江健一，田中竹延，津久井朗太，松尾公一，杉山和稔，松尾重明：北海道北部，幌延地域における大曲断層の三次元分布と水理特性。地質学雑誌，vol.112, 5, pp.301-314 (2007).
- [3] 後藤淳一，吉村公孝，西尾光，唐崎建二，木方建造：概要調査に向けた断層の水理特性の調査・評価手法に関する検討：成果のとりまとめ。日本応用地質学会平成 25 年度研究発表会講演論文集，pp.37-38(2013).
- [4] Graymer, R.W.: Geologic map and map database of the Oakland metropolitan area, Alameda, Contra Costa and San Francisco Counties, California. *USGS Miscellaneous Field Studies* MF2342g. Version 1.0 (2000).
- [5] 吉村公孝，後藤淳一，唐崎建二：断層の水理特性把握を対象にした物理探査の適用性に関する検討。物理探査学会第 127 回学術講演会論文集，pp.147-150 (2012).
- [6] 田中姿郎，濱田崇臣，上田圭一，伊藤久敏，大西セリア智恵美，佃十宏，後藤淳一，唐崎建二，木方建造：概要調査に向けた断層の水理特性の調査・評価手法に関する検討 - Wildcat 断層の構造と水理特性 - . 日本応用地質学会平成 24 年度研究発表会講演論文集，pp.161-162 (2012).
- [7] 長谷川琢磨，中田弘太郎，後藤淳一，唐崎健二，上田圭一，木方建造：地下水年代測定による断層の水理特性評価の試み。日本地下水学会 2012 年秋季講演会講演要旨集，pp.148-153 (2012).
- [8] Karasaki, K., Christine D., Onishi, C.T., Goto J.: Development of Geohydrologic Model of the Wildcat Fault Zone. *Transp Porous Med* (2015), 108:3–22, DOI 10.1007/s11242-014-0348-x. (2015).

