

地質環境長期安定性評価確証技術開発 (1)地質環境長期変動モデル (東濃地域)

Geosphere Stability Project (1) Development of Geological-Evolutionary Model in the Tono area

*尾上 博則¹、小松 哲也¹、安江 健一¹、岩月 輝希¹、竹内 竜史¹、加藤 智子¹、笹尾 英嗣¹、梅田 浩司¹

*HIRONORI ONOE¹, TETSUYA KOMATSU¹, KEN-ICHI YASUE¹, TERUKI IWATSUKI¹, RYUJI Takeuchi¹, TOMOKO KATO¹, EIJI Sasao¹, 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

はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業においては、処分施設閉鎖後、数万年以上に及び時間スケールを対象とした安全評価が実施される。この安全評価では、将来の自然現象に伴う地質環境特性の長期安定性の評価が重要であり、そのためには超長期の地質環境の変動を考慮できる数値モデル（以下、地質環境長期変動モデル）を構築することが必要である。

日本原子力研究開発機構では、地質環境長期変動モデルの構築技術の開発を目的として、東濃地域と幌延地域を山間部と平野部の事例とした研究を実施しており、これまでに地形・地質、水理、地球化学、地表環境の分野ごとに地質環境長期変動モデルに対する影響因子（FEP; Features, Events and Processes）を抽出するとともに、影響因子の相互関係を整理し、長期変遷シナリオの整備を進めてきた。また、地形・地質及び地表環境の長期変遷シナリオを考慮した水理モデルを構築し、地下水流動特性の長期変動の空間分布の評価や地下水流動特性評価における重要な影響因子の抽出を目的とした検討を実施した。

本稿では、山間部として岐阜県南東部の東濃地域を事例とした地質環境長期変動モデルの技術開発に関するこれまでの取り組み及び成果の概要を紹介する。

実施概要及び主な成果

東濃地域を事例とした地質環境長期変動モデルの開発は、土岐市西方の深谷部より上流部に位置する約20 km四方の土岐川流域（以下、モデル化領域）を対象として実施した。これまでに整理されたモデル化領域周辺における過去百万年から現在までの地形・地質発達史に基づき、現在及び過去の特徴的な4つのステージ

（300万年前、100万年前、45万年前、14万年前）を設定した。各ステージの地形・地質モデルは、地形・地質発達史から「古地形面の復元」、「断層山地の隆起」、「濃尾傾動運動による地域全体の隆起」、「地形の開析」の4点を考慮しつつ、既存情報及び地理情報システムを活用して構築した。

水理モデルでは、地形・地質モデルをベースとして空間的に離散化することで構築した各ステージの三次元水理地質構造モデルを用いて定常状態の地下水流動解析を実施した。地下水流動解析では、東濃地域の地下水流動特性に関わるFEPの相関等を参考に、地下水流動特性に大きな影響を及ぼす可能性がある影響因子として「地形変化」、「涵養量の変化」及び「断層の透水性」を抽出し、これらの影響因子が地下水流動特性の長期変動に及ぼす影響の評価を目的とした感度解析を実施した。なお、涵養量の変化については、地表環境条件に基づき推定した過去（氷期・間氷期）の涵養量を感度パラメータとして適用した。これらの影響因子に起因する地下水流動特性の長期変動については、感度解析結果に基づく統計解析で評価し、地下水流動特性の長期変動の空間分布の推定を試みるとともに、東濃地域の地下水流動特性評価における重要因子の抽出などを検討した。さらに、地球化学的な観点から地下水流動解析結果を整理した。上記の検討で得られた主な成果を以下に示す。

・地形・地質モデル、水理モデル及び地表環境モデルとの統合を図りつつ、山間部を対象とした場合の過去百万年以上の時間スケールにおける古地形の復元及び地形・地質モデル及び水理モデルの構築、地下水流動特性の長期変動の空間分布の評価、ならびに地下水流動特性評価における重要因子の抽出のためのアプローチを具体例として示した。

・地下水流動特性の長期変動の空間分布の推定にあたっては、地下水の移行時間が有効な評価指標であり、影響因子による地下水流動特性の影響度及び変化量の定量的な評価が可能であることを示した。

・山間部である東濃地域での長期変遷の地下水流動特性評価における重要因子として、地形変化が抽出され

た。

・地下水流動解析結果と地下水の地球化学特性（化学組成、pH・酸化還元電位）分布との定性的な比較検討の結果、水理学的及び地球化学的な観点の両面から数千年～数万年の時間スケールの地下水の滞留領域が存在することを明らかにした。

今後の課題

今後は、これまでの検討結果を踏まえて、各地質環境長期変動モデルの構築に関する情報、ノウハウ及び各モデルが有する不確実性を整理するとともに、各地質環境長期変動モデルの統合化を図る。さらに、平野部（幌延地域）における検討結果と比較しつつ、山間部における地質環境特性の変動を理解するための調査からモデル化解析・評価に至る一連の方法論の体系化を進める。

「本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。」

キーワード：地質環境長期安定性、地質環境長期変動モデル、高レベル放射性廃棄物、地層処分、東濃地域、山間部

Keywords: Long-term stability of the geological environments, Geological-Evolutionary Model, High-level radioactive waste, Geological disposal, Tono area, Mountain area

地質環境長期安定性評価確証技術開発

(2)地質環境長期変動モデル(幌延地域)

Geosphere Stability Project

(2) Development of Geological-Evolutionary Model in the Horonobe area

*松岡 稔幸¹、小松 哲也¹、安江 健一¹、尾上 博則¹、大山 卓也¹、岩月 輝希¹、笹尾 英嗣¹、梅田 浩司¹

*Toshiyuki MATSUOKA¹, Tetsuya KOMATSU¹, Ken-ichi YASUE¹, Hironori ONOE¹, Takuya OHYAMA¹, Teruki IWATSUKI¹, Eiji SASAO¹, 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

はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業においては、処分施設閉鎖後、数万年以上に及ぶ時間スケールを対象とした安全評価が実施される。この安全評価では、将来の自然現象に伴う地質環境特性の長期安定性の評価が重要であり、そのためには超長期の地質環境の変動を考慮できる数値モデル(以下、地質環境長期変動モデル)を構築することが必要である。

日本原子力研究開発機構では、地質環境長期変動モデルの構築技術の開発を目的として、東濃地域と幌延地域を山間部と平野部の事例とした研究を実施しており、これまでに地形・地質、水理、地球化学、地表環境の分野ごとに地質環境長期変動モデルに対する影響因子(FEP; Features, Events and Processes)を抽出するとともに、影響因子の相互関係を整理し、長期変遷シナリオの整備を進めてきた。また、地形・地質及び地表環境の長期変遷シナリオを考慮した水理モデルを構築し、地下水流動特性の長期変動の空間分布の評価や地下水流動特性評価における重要な影響因子の抽出を目的とした検討を実施した。

本稿では、平野部として北海道北部の幌延地域を事例とした地質環境長期変動モデルの技術開発に関するこれまでの取り組み及び成果の概要を紹介する。

実施概要及び主な成果

幌延地域を事例とした地質環境長期変動モデルの開発は、海水準変動による海岸線の移動や地形・地質の変化などを考慮して、海域(大陸棚外縁~汀線)と陸域(平野及び丘陵)を含む、東西約90km、南北約30kmの領域(以下、モデル化領域)を対象として実施した。これまでに整理されたモデル化領域周辺の過去数百万年から現在までの地形・地質発達史に基づき、現在及び過去の特徴的な2つのステージ(モデル化領域東部の宗谷丘陵が陸化:約1Ma、宗谷丘陵の西方が陸化:約330ka)を設定した。両ステージの地形・地質モデルは、地形・地質発達史から約2.3Ma以降の東西圧縮応力場に伴う地形・地質の変化(断層・褶曲運動と隆起・侵食、沈降・堆積、割れ目の形成発達など)を考慮し、既存情報及び地理情報システムを活用して構築した。

水理モデルでは、地形・地質モデルをベースに構築した三次元水理地質構造モデルを用いて定常状態の地下水流動解析を実施した。地下水流動解析では、地下水流動特性に関わるFEPの相関等を参考に、地下水流動特性に大きな影響を及ぼす可能性がある影響因子として「地形変化」、「気候変動(涵養量及び海水準変動)」、「断層分布」、「断層や地層の透水性」及び「氷期における不連続永久凍土の形成」を抽出し、これらが地下水流動特性に及ぼす長期変動の評価を目的とした感度解析を実施した。なお、不連続永久凍土については、現在の湖や河川部などにタリク(未凍結部)を設定し、その影響を検討した。長期変遷に伴う地下水流動特性の変化は、感度解析結果に基づく統計解析で評価し、地下水流動特性評価における重要因子の抽出などの検討を行うとともに、地球化学的な観点から地下水流動解析結果を整理した。主な成果を以下に示す。

・平野部を対象とした過去百万年の時間スケールにおける古地形及び地質構造の復元、地形・地質モデル及び水理モデルの構築、地下水流動特性の長期変動の空間分布の評価、ならびに地下水流動特性評価における重要因子の抽出のためのアプローチの具体例を示した。

・地下水流動特性の長期変動の空間分布の推定には、地下水の移行時間が有効な評価指標であり、影響因子による地下水流動特性の影響度及び変化量の定量的な評価が可能であることを示した。

・平野部である幌延地域での長期変遷の地下水流動特性評価における重要因子として地形変化と気候変動が抽

出された。また、氷期における不連続永久凍土の影響は、気候変動の影響と比べて2オーダー程度小さいことが確認できた。

- ・平野部は山間部と比較して地下水流動は緩慢であるものの、自然現象の変化による影響を受けやすい特徴があることを定量的に示した。
- ・地下水流動解析結果と地下水の地球化学特性（化学組成とpH・酸化還元電位）分布との定性的な比較検討の結果、水理的及び地球化学的な観点の両面から数十万年～百万年の時間スケールの地下水の滞留領域を示した。

今後の課題

今後は、これまでの検討結果を踏まえて、各地質環境長期変動モデルの構築に関する情報、ノウハウ及び各モデルが有する不確実性を整理するとともに、各地質環境長期変動モデルの統合化を図る。また、山間部（東濃地域）における検討結果と比較しつつ、平野部における地質環境特性の変動を理解するための調査からモデル化解析・評価に至る一連の方法論の体系化を進める。

「本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。」

キーワード：地質環境長期安定性、地質環境長期変動モデル、高レベル放射性廃棄物、地層処分、幌延地域、平野部

Keywords: Geosphere stability, Geological-evolutionary model, High-level radioactive waste, Geological disposal, Horonobe area, Plain area

地質環境長期安定性評価確証技術開発（3）後背地解析技術
Geosphere Stability Project (3) Provenance analysis techniques

*徳安 佳代子¹、安江 健一¹、小松 哲也¹、田村 糸子¹、堀内 泰治¹

*Kayoko Tokuyasu¹, Kenichi Yasue¹, Tetsuya Komatsu¹, Itoko Tamura¹, Yasuharu Horiuchi¹

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

日本の山地では一般的に、隆起に伴う高度の増大と同時に、侵食速度が増大する傾向がある。侵食速度が隆起速度と動的平衡状態にある山地では、時間が経っても平均高度が一定に保たれるため、山地から平野に至るスケールでの地下水の流れには時間経過による大きな変化が生じないと考えられる。一方、隆起開始から時間が十分に経過しておらず動的平衡状態に至っていない山地は、今後ある期間で高度の増大に伴って、地下水の流れに変化が生じる可能性がある。放射性廃棄物の地層処分においては、このような地形変化に伴う地下水の流れなどの地質環境の把握が重要である。そのため、本技術開発では、山地の形成過程を把握するための後背地解析技術として、堆積物中の石英粒子の電子スピン共鳴（以下、ESR）の信号特性を用いた手法の開発を進めている。

この手法開発は、東濃地域に分布する堆積物を事例に実施した。東濃地域には、中新世の瑞浪層群と中新～更新世の東海層群（ここでは下位の土岐口陶土層と上位の土岐砂礫層に区分される）が広く分布しており、その基盤は北部～北東部では主に美濃帯の堆積岩と濃飛流紋岩、山陽帯の花崗岩であり、南部では主に領家帯の花崗岩類である。このような地質的な特徴から、堆積物の供給源を特定することが可能な地域であり、これまでに土岐砂礫層の礫などを用いた山地形成に関する研究が行われてきた（例えば、森山，1990）。

ESR測定に用いた試料は、木曾川の支流である付知川と阿寺断層の間に位置する採石場に露出する土岐砂礫層中の砂層（8試料）及び、東濃地域とその周辺に分布する基盤岩（濃飛流紋岩（3試料）、山陽帯及び領家帯の花崗岩類（7試料））である。採石場では、濃飛流紋岩を層厚約30mの土岐砂礫層が覆っている。この砂礫層に含まれる礫種は、下部が濃飛流紋岩の礫だけであるのに対し、上部が濃飛流紋岩・花崗岩・玄武岩の複数の礫である。このことから、砂礫層の下部と上部では後背地が異なることが想定される。

砂層と基盤岩から石英粒子を抽出し、ESR測定（Al、Ti-Li、E₁'中心信号の測定）を行った。その結果、下部の砂層の信号強度は濃飛流紋岩の値に近く、上部の砂層の信号強度は、山陽帯花崗岩に近い値を示した。この結果と堆積時期に関する情報を踏まえると、下部の堆積時（約3.9～2.0Ma）には流域に花崗岩が露出しておらず、上部の堆積時（約2.0Ma以降）に花崗岩が露出した可能性が推定でき、ESR信号特性を用いることで堆積物の供給源の変化を推定できる可能性が見出された。今後、地球化学分析や古流向解析などの他の手法と組み合わせることで、より詳しい後背地解析が実現できると考えられる。

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。

キーワード：地質環境長期安定性、後背地解析技術、電子スピン共鳴法、高レベル放射性廃棄物、地層処分
Keywords: Geosphere stability, Provenance analysis techniques, Electron Spin Resonance method, High-level radioactive waste, Geological disposal

地質環境長期安定性評価確証技術開発 (4) 地殻変動予測技術

Geosphere Stability Project (4) Numerical modeling techniques for crustal movement

*渡部 豪¹、奥山 哲²、浅森 浩一¹、梅田 浩司³*Tsuayoshi Watanabe¹, Satoshi Okuyama², Koichi Asamori¹, Koji Umeda³

1.日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター、2.気象庁 気象研究所、3.弘前大学大学院 理工学研究科
 1.Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency, 2.Meteorological Research Institute,
 3.Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

高レベル放射性廃棄物の地層処分における数万～数十万年の長期間の地質環境のモデル化は、過去の自然現象の偏在性や変動傾向に基づき、将来への外挿が基本となる。しかし、地形・地質学的に推測される過去のイベントや変動パターンは、年代や地域によって識別できる分解能が異なり、将来の変化に対する外挿結果に纏わる不確かさも様々である。日本列島について、この手法の適応性について考えてみると、日本列島は、プレート沈み込みにより長期にわたって短縮変形を受け、複雑な地形・地質構造を形成している。これは、時間スケールの異なる変動の重ね合わせであり、長期間の変動を推定する際、可能な限り個々の変動の時間変化を考慮する必要がある。ただ、全ての変動について時間変化を追うことは現実的に不可能である。したがって、より現実的にプレート間相互作用をモデル化し、長期間の地殻変動を推定できる手法を構築できれば、外挿による地殻変動予測に対する不確かさの軽減に繋がると考えられる。そこで本研究では、地質学的データから推定されるひずみ速度分布より、長期間のプレート間相互作用をモデル化し、地球物理学的観測から推定される地殻の粘弾性不均質を考慮した数値シミュレーションに応用することで、長期間の地殻変動を推定する手法を構築する。このうち本報告では、(1)活断層データを用いた地質学的ひずみ速度の推定及び(2)粘弾性不均質を考慮したシミュレーションについて報告する。

(1) 活断層データを用いた地質学的ひずみ速度の推定

産業技術総合研究所活断層データベースに掲載される活断層のうち418セグメントを対象とし、断層パラメータより1000年間の地震モーメント・モーメントテンソル密度を求め、Kostrov (1974)^[1]の定式に従い、概ね80x80 km、深さ15 kmの領域に対して、水平方向のひずみ速度を推定した。

その結果、日本列島における大局的なひずみ速度の特徴として、太平洋・フィリピン海プレートの沈み込み方向への短縮が卓越することが明らかになった。中部日本を含む西南日本においては、概ね南北～北東-南西方向の伸長が、北陸～中部地方内陸部では、新潟-神戸歪集中帯付近で大きなひずみ速度が推定され、牛首、跡津川、高山・大原断層帯を含む領域では、短縮のみでなく顕著な伸長(N96.8～97.4°E方向に $3.0\sim 5.2\times 10^{-8}$ /yrの短縮、N6.8～7.4°E方向に $1.5\sim 2.6\times 10^{-8}$ /yrの伸長)も認められた。四国地方では、N108.0～124.7°E方向に $1.5\sim 2.7\times 10^{-8}$ /yrの短縮、N18.0～34.7°E方向に $1.5\sim 2.6\times 10^{-8}$ /yrの伸長が示された。九州地方では、九州北部と島原-別府地溝帯の東部と西部に活断層が分布するが、平均変位速度が小さいために大きなひずみ速度は得られていないものの、島原-別府地溝帯内の領域で、N4.5～9.6°E方向に $9.6\times 10^{-9}\sim 1.4\times 10^{-8}$ /yrの伸長ひずみ速度が得られた。

以上の結果は、長期間のプレート間相互作用に起因すると考えられ、数万年以上の時間スケールを対象とした地殻変動シミュレーションを行う場合、これらの地域性を考慮することが重要であると考えられる。

(2) 粘弾性不均質を考慮したシミュレーション

2011年東北地方太平洋沖地震(東北地震)の発生後、茨城・福島県境付近の地殻浅部において、正断層型の群発地震活動が活発化した。東北地震前の応力テンソルインバージョンでは、深さ15 km以浅で正断層型、それ以深で逆断層型を示し、浅部では東北地震前から伸張場であった(Yoshida et al., 2015^[2])。また、この領域では局所的な隆起も報告されており、特異なテクトニクスであることを示唆している。これに関し、地震波トモグラフィーやMT法の結果、群発地震震源域下に流体の存在を示唆する低地震波速度・低比抵抗域が推定されており(Umeda et al., 2015^[3])、この地域の地殻変動との関連性が示唆される。ここでは、地殻変動への地殻流体の寄与について検討するため、低比抵抗域(流体分布域)をMaxwell粘弾性体として表現した二次元有限要素法による地殻変動シミュレーションを実施した。

得られた100年後の鉛直変位では、流体分布域の上部で隆起が生じ、測地的に観測された鉛直変位パターン

(Suwa et al., 2006^[4]) と調和的な傾向を示す。また、水平応力は流体分布域の直上で圧縮、それ以浅では伸張応力を示し、Yoshida et al. (2015)^[2] の結果と調和的であった。これらは、流体分布域の変形が周囲より大きく、その上部にある地殻のみで圧縮応力を支えた結果、その部分で座屈が生じることに起因すると考えられる。以上の結果は、地殻流体が周辺の地殻変動に密接に関与しており、シミュレーションにおいて地殻の粘弾性不均質を考慮することが重要であることを示唆する。

[1] Kostrov (1974): Seismic moment and energy of earthquakes, and seismic flow of rock, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, vol.1, 1974, pp.23-40.

[2] Yoshida et al. (2015): Spatial variation of stress orientations in NE Japan revealed by dense seismic observations, *Tectonophysics*, vol.647-648, 2015, pp.63-72.

[3] Umeda et al. (2015): Triggering of earthquake swarms following the 2011 Tohoku megathrust earthquake, *Journal of Geophysical Research*, vol.120, 2015, pp.2279-2291.

[4] Suwa et al. (2006): Interplate coupling beneath NE Japan inferred from three dimensional displacement field, *Journal of Geophysical Research*, vol.111, 2006, doi:10.1029/2004JB003203.

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。

キーワード：地層処分、長期間のプレート間相互作用、地質学的ひずみ速度、地殻変動シミュレーション、粘弾性不均質

Keywords: deep geological repository of high-level radioactive waste, plate interaction for a long time, geological strain rate, simulation of crustal deformation, visco-elastic heterogeneity

地質環境長期安定性評価確証技術開発 (5)地下水涵養量推定技術

Geosphere Stability Project (5) Estimation of Groundwater Recharge Rate in Consideration of long-term Changes in Surface Hydrological Environment

*竹内 竜史¹、尾上 博則¹、安江 健一¹

*Ryuji Takeuchi¹, HIRONORI ONOE¹, Ken-ichi Yasue¹

1. 日本原子力研究開発機構

1. Japan Atomic Energy Agency

はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分を考慮する数万年以上に及ぶ時間スケールでは、気候変動や隆起・侵食による地形変化などにより地表水文環境に変化が生じる。特に、降水量、蒸発散量、河川流量の変化は、地下深部の地下水流動の上部境界条件となる地下水涵養量を変化させるため、長期的な地表水文環境の変化を見込んだ地下水涵養量の推定が重要となる。本技術開発では、山間部を対象として、過去から現在における気候変動と地形変化を考慮した地下水涵養量の推定を実施した。

地下水涵養量の推定方法

地下水涵養量は水収支法により推定する。水収支法を用いるためには、地表水文要素である降水量、蒸発散量および河川流量の推定が必要となる。

既往研究で報告された既存の観測データを整理した結果から、降水量と蒸発散量は気温に対して概ね正の相関関係を示すことが確認されている¹⁾。したがって、過去の気候から気温を推定することにより、降水量と蒸発散量を算出することができる。河川流量については、流域の地形の特徴に基づいて算出される河川流量に関する指標（流出指標）と同流域の河川流量データ、流域の降水量データから、降水量に対する河川流量の割合（流出率）を算出する方法²⁾を適用する。

山間部における適用例

本手法の適用性を確認するため、中部地方南部の比較的低標高で小起伏な山地～丘陵を流域とする庄内川（流域面積約340km²）を例に、地下水涵養量を推定した。対象とする時間断面は、対象地域の地形モデルが作成されている100万年前、45万年前、14万年前および現在とし³⁾、各時間断面の地形及び気候条件（氷期と間氷期）を考慮した。

対象地域における過去30万年の気温は、寒冷な時期と温暖な時期で約8～10℃の気温差で推移しており⁴⁾、この結果を基に、現在の平均気温を基準として氷期、間氷期の気温を算出した。

推定された過去の気温に対し、降水量は、太平洋沿岸、北アジア、北ヨーロッパ、北アメリカの観測データ（気温と降水量）¹⁾から得られる相関式、蒸発散量は気温と実蒸発散量の関係¹⁾に東濃地域の観測結果⁵⁾を考慮した関係式を用いて推定した。

河川流量は、数値標高モデル（DEM）で表現される現在の地形と過去の地形に共通する流出指標を求め、現在の地形の流出指標と観測結果から得られる流出率との相関式に過去の地形の流出指標を代入し算出した。

これらの結果、観測データ等に基づく現在の地形で間氷期の気候条件での地下水涵養量118mm/年に対し、各時間断面の地下水涵養量は45万年前（氷期）118～172%、45万年前（間氷期）147～273%、14万年前（氷期）81～135%、14万年前（間氷期）88～196%と推定された。なお、現在の地形で氷期の気候条件下では58～72%となった。過去の氷期においては、現在の間氷期の気候条件よりも降水量や蒸発散量が減少するにもかかわらず、地下水涵養量は現在より増加する結果となった。これは、地形変化に伴う河川流量の変化が地下水涵養量の変化に大きな影響を与えることを示唆している。

一方で、起伏が乏しく平坦な地形が推定された100万年前については、地形の特徴に基づく河川流量の推定が困難であった。平坦な地形に対応した流域抽出手法の改良と平野部における本手法の適用性の確認が今後の課題である。

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。

引用文献

- 1) (独)日本原子力研究開発機構：平成25年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書、経済産業省資源エネルギー庁、2014、pp.166-169.
- 2) (独)日本原子力研究開発機構：平成26年度地層処分技術調査等事業地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書、経済産業省資源エネルギー庁、2015、pp.160-177.
- 3) 尾上博則ほか：地質環境長期安定性評価確証技術開発 地質環境長期変動モデル（東濃地域）、日本地球惑星科学連合2016大会、2016年5月、千葉、2016.
- 4) 佐々木俊法ほか：東濃地方内陸小盆地堆積物の分析による過去30万年間の古気候変動、第四紀研究、vol.45、2006、pp.275-286.
- 5) 上野哲郎、竹内竜史：超深地層研究所計画における表層水理観測データ集－2014年度－、日本原子力研究開発機構、JAEA Data/Code2015-031、2016.

キーワード：高レベル放射性廃棄物、地層処分、地下水涵養量、気候変化、地形変化

Keywords: High-level radioactive waste, Geological disposal, Groundwater recharge rate, Change of climate in long-term, Change of landform in long-term

地質環境長期安定性評価確証技術開発 (6)炭酸塩鉱物測定技術

Geosphere stability project (6) Chronological and chemical analyses of carbonate minerals

*渡邊 隆広¹、國分 陽子¹、村上 裕晃¹、横山 立憲¹、雨宮 浩樹¹、水野 崇¹、久保田 満¹、岩月 輝希¹*Takahiro Watanabe¹, Yoko Kokubu¹, Hiroaki Murakami¹, Tatsunori Yokoyama¹, Hiroki Amamiya¹, Takashi Mizuno¹, Mitsuru Kubota¹, Teruki Iwatsuki¹

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

はじめに

地質環境の長期安定性を評価するためには、過去の地質環境の変動幅を把握し、その結果に基づいて将来の変動幅を推定するといった手法の構築が必要である。このためには、過去の地下水の流動特性や化学的条件（酸化還元電位やpH）を把握することが必要である¹⁾。これまでに地下水の化学組成に基づいて、地下水の滞留時間を評価する試みが行われてきたが²⁾、過去の地下水の化学的条件の変遷を連続的に把握することは困難であった。一方、地下水から沈殿した炭酸塩鉱物は、沈殿当時の年代と化学的狀態を示す成分（例えばウラン、鉛、鉄や希土類元素の相対量など）を保持している可能性が高い^{3)、4)}。加えて、炭酸塩鉱物は環境中に普遍的に存在していることから、汎用的な古環境指標として有効と考えられる。岩盤中の割れ目を充填する炭酸塩鉱物の年代測定と化学分析を実施することにより、化学的狀態の長期変遷を推定することが可能になると期待される。

炭酸塩鉱物のウラン-鉛（以下、U-Pb）年代測定や化学分析は、これまでに全岩溶液試料を対象とした測定が進められてきたが⁵⁾、炭酸塩鉱物の結晶成長を反映した累帯構造に着目し¹⁾、局所領域をターゲットとした分析手法を確立することにより、位置ごとの元素・同位体情報を得ることが可能となる。従って、炭酸塩鉱物を古環境指標として活用するためには、局所領域を数十マイクロメートル以下で分析可能なレーザーアブレーション付き誘導結合プラズマ質量分析計（LA-ICP質量分析計）が有効と考えられる。本技術開発においては、日本原子力研究開発機構 土岐地球年代学研究所に導入したLA-ICP質量分析計を用いて、炭酸塩鉱物の局所領域のU-Pb年代測定について技術基盤の構築を進めた。さらに、過去の化学的狀態を推定するため、炭酸塩鉱物と地下水間の鉄の分配係数をもとにした酸化還元電位推定手法の適用性を検討した。

技術開発概要とこれまでの主な成果

(1) LA-ICP質量分析法による年代測定技術の開発

炭酸塩鉱物の局所領域同位体分析においては、均質性の担保された炭酸塩鉱物から成る標準試料の選定や低濃度なU、Pbの元素比測定と高精度なPb同位体比測定が求められる。これらの課題に対応するため、本技術開発では天然の炭酸塩鉱物から標準試料候補の選定を開始した。また、均質性の確認と局所領域分析における分析点の選定には、2次元分布分析（イメージング）を採用した結果、視覚的にも元素・同位体分布を把握することが可能となった¹⁾。Pb同位体分析においては、存在度の低いPb同位体の検出にマルチイオンカウンティング方式と高増幅率アンプを備えたマルチファラデーカップ方式を採用し、高精度Pb同位体比測定を実現した¹⁾。

(2) 酸化還元電位推定技術の構築

これまでに、地下水から炭酸塩鉱物が沈殿する際に取り込まれる鉄の量から、過去の地下水の酸化還元電位を理論的に計算する試みが進められている^{3)、4)}。本技術開発ではICP質量分析計を用いて天然の炭酸塩鉱物中の鉄含有量を測定し、報告されている理論式³⁾から得られた計算値の妥当性を評価した。岐阜県東濃地域のボーリング試料（DH5、6、7、8、12）、島根県西部および山梨県東部の石灰華試料を用いた。DH6、7、8試料では鉄含有量から得られた酸化還元電位の計算値と、現場で実測した地下水の値がおおよそ一致した。DH7では、計算値が標準水素電極を基準とした $ORP_{S.H.E.}$ で約-450mV、実測値が約-400mVであった。しかし、DH5、12および石灰華試料では実測値よりも100mV以上異なる値を示した。計算値と実測値との差異については、酸化的な表層水の混入などによる影響が示唆される。従って、今後は理論式が適用可能な条件と、適用不可となる条件を明らかにすることが必要となる。

本報告は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確証技術開発）」の成果の一部である。

引用文献

- 1) 日本原子力研究開発機構、平成26年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書、2015、229p.
- 2) Iwatsuki et al., Appl. Geochem., vol.17、2002、1241-1257.
- 3) Arthur et al., Geochem. Explor. Environ. Anal., vol.6、2006、pp.33-48.
- 4) 水野・岩月、地球化学、vol.40、2006、pp.33-45.
- 5) Becker et al., Earth Planet. Sci. Lett., vol.203、2002、pp.681-689.

キーワード：炭酸塩鉱物、放射年代測定、酸化還元電位、LA-ICP質量分析計、地質環境長期安定性、地層処分
Keywords: carbonate minerals, radiometric dating, redox potential, LA-ICPMS, geosphere stability, geological disposal

放射性炭素 (^{14}C) 濃度に基づく深部地下水の流動状態の推定

Estimation of hydraulic conditions of groundwater using carbon isotope

*加藤 利弘¹、岩月 輝希¹、中田 弘太郎²、長谷川 琢磨²*toshihiro kato¹, Teruki Iwatuki¹, Kotaro Nakata², Takuma Hasegawa²

1.日本原子力研究開発機構、2.電力中央研究所

1.Japan Atomic Energy Agency, 2.Central Research Institute of Electric Power Industry

はじめに

地下水流動は地下圏における物質循環を考察する上で欠くことのできない情報の一つであり、水理学的な数値解析や化学的指標に基づく滞留時間の推定などの評価手法を併用することにより確度の高い評価が可能となる。日本原子力開発研究機構の瑞浪超深地層研究所においては、これまでに深度500 mまでの研究坑道の掘削を通して、地下水流動や地下水の化学特性を把握するとともに大規模地下施設が周辺の地下水に与える影響の評価を行ってきた。本研究では、新たに地下水中の ^{14}C 濃度に関わるデータを取得し、その深度分布や水理地質構造などとの関連を基に地下水の滞留状態について考察した。

方法

地上から深度約100~170 mの堆積岩中に掘削されたボーリング孔および深度200 m~500 mの研究坑道から花崗岩中に掘削されたボーリング孔において、各深度の地下水を大気に触れないように採取した。なお、花崗岩においては、比較的岩盤の透水性が高い領域と透水性の低い領域に掘削されたボーリング孔の地下水をそれぞれ採取した。採取試料の主要成分分析、物理化学パラメータ測定を行うとともに、溶存無機炭素を沈殿法またはガス化法により回収した。溶存無機炭素の安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$ 値) と ^{14}C 濃度を安定同位体比質量分析装置、加速器質量分析装置で測定した。

結果・考察

堆積岩、花崗岩の地下水中の ^{14}C 濃度を測定した結果、それぞれの値は3~100 pMC*、2~31 pMCと求められた。堆積岩直下の花崗岩中(深度約200 m)の地下水の ^{14}C 濃度は、堆積岩深部(深度140 m)の ^{14}C 濃度より高く、堆積岩深部の地下水に比べて若い年代の地下水が、堆積岩と花崗岩の不整合面に沿って流入している可能性が考えられた。花崗岩中の透水性が高い領域の ^{14}C 濃度はばらつきが大きく、深度200 m~400 mで約4~31 pMCであった。一方、花崗岩中の透水性が低い領域の ^{14}C 濃度は、深度300 mで約6~25 pMC、深度500 mで約2~16 pMCとなり、透水性が高い領域に比べ ^{14}C 濃度が低く年代が古い傾向を示した。透水性が高い領域では、研究坑道への地下水の引き込みにより鉛直方向の地下水流動が大きくなっていると推察された。また、透水性が低い領域では、地下水の流動性が小さく相対的に古い地下水が存在すると考えられた。

^{14}C 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ 値の関係をみると、 ^{14}C 濃度が小さくなるほど $\delta^{13}\text{C}$ 値が高くなる傾向を示した。地下水中の溶存無機炭素の $\delta^{13}\text{C}$ 値は、岩石中の炭酸塩鉱物が地下水中に溶解し鉱物由来の無機炭素が加わるか、 $\delta^{13}\text{C}$ 値の異なる地下水が混合することにより変化すると推察される。炭酸塩鉱物由来の無機炭素は通常、5万年以上経過して ^{14}C を含まない“デッドカーボン”であるため、鉱物由来の無機炭素が地下水に加わった場合はデッドカーボンの混入による ^{14}C 濃度の変化を補正する必要がある。炭酸塩鉱物の溶解については、各深度の地下水のpH、カルシウムイオン濃度、溶存無機炭酸濃度に基づいて、地下水に対する飽和指数を算出した結果、花崗岩領域の深度200 m~500 mの地下水は概ね炭酸塩鉱物に対し飽和~過飽和(炭酸カルシウムが溶解しない条件)にあると判断された。そのため、 ^{14}C 濃度と $\delta^{13}\text{C}$ 値の相関は、それらの値の異なる地下水の混合を反映している可能性が考えられた。

今後は、これらの知見を勘案した上で、 ^{14}C 濃度を基に地下水の滞留時間を推定し、地下水流動解析に反映させていく。

* pMC: 現代の大気中の ^{14}C 濃度を基準として試料中の ^{14}C 濃度をパーセンテージで表した単位

キーワード: 炭素同位体、地下水、流動状態

Keywords: carbon isotope, groundwater, hydraulic condition

高レベル放射性廃棄物処分場ニアフィールドの長期力学的挙動評価のための遠心力模型実験手法の開発

Development of centrifuge model test for evaluation of long term geomechanical behavior in HLW near field

*西本 壮志¹

*Soshi Nishimoto¹

1. (一財) 電力中央研究所

1. Central Research Institute of Electric Power Industry

高レベル放射性廃棄物処分場周辺（ニアフィールド）の人工バリアと周辺岩盤の長期挙動評価に関する研究において、実規模実証試験や予測数値解析シミュレーションが実施されている。日本原子力研究開発機構・幌延深地層研究センターにおいて、現在国内唯一の実規模実証試験「人工バリア性能確認試験」が地下350mで実施されている。数値解析結果の妥当性検証のために実規模試験結果との比較・検討を行うことは数値解析モデルの高精度化のために有効な手段の一つである。しかし、実規模実証試験を実施できる期間は長くても現実的には十数年程度であり、その試験結果を用いて百年単位の長期挙動を予測するための数値解析モデルを高精度化するには限りがある。

遠心力場の相似則を利用した遠心力模型実験は、実物と縮尺模型の応力の対応が良く、力学的・水理的挙動も実物に近い。また遠心力場の相似則における時間加速の効果により、長時間の遠心力模型実験を行うことでニアフィールドの長期力学的挙動の推定に対して有利である。このため実物の長期力学的挙動をある程度推定できる可能性がある。

電力中央研究所ではこの点に着目し、最長6ヶ月の連続運転、最大1.5 tonの模型が搭載可能な遠心力載荷装置と、同装置を用いたニアフィールドの長期力学的挙動評価実験の開発を行ってきた。

本開発では、緩衝材と周辺岩盤の力学的相互作用をターゲットにし、周辺岩盤を含めたニアフィールド模型を作成、長期挙動実験を行ってきた。

まず、周辺岩盤を含めた処分孔1孔・廃棄体1体の領域を抽出し模型を作製した。岩盤は田下凝灰岩、緩衝材はクニゲルV1（100%）、模擬オーバーパックは所定の重量調整を行ったSUSである。模型サイズは遠心力30G場での実験を行うために1/30サイズとした。直径、高さ180mmの円柱岩盤供試体に処分孔を掘削、オーバーパックおよび緩衝材を封入した。実験は、現象理解のために、乾燥状態の模型に対して、深度をパラメータ（地圧に相当する拘束圧5~10MPa）にした等方応力を負荷し、模型下面より間隙水を注水し上面から排出する排水条件下の、水理-力学連成条件である。オーバーパックの温度と境界温度は実験を通じて25℃一定とした（以下、常温実験、と言う）。計測項目はオーバーパックの鉛直変位、ベントナイトの土圧、岩盤のひずみである。実験は最長67日、約165年に相当するデータを得た。その結果、オーバーパックの変位量、ベントナイトの土圧が拘束圧により変化し、かつ実験期間内において収束しないことが分かった。すなわち地圧と時間経過に応じた岩盤の変形挙動とベントナイトの膨潤変形挙動の力学的相互作用によって、オーバーパックの変位量、ベントナイトの土圧に地圧依存性・時間依存性が生じることを実験的に初めて明らかにした。

次に、ヒーターを封入した加熱可能なオーバーパックの開発を行い、同様の模型に対して深度をパラメータにして、オーバーパックの温度を95℃一定、境界温度を平均的な地温勾配に則した温度（30~35℃）に設定し、最長212年（実験時間86日）に相当するデータを得た（以下、加熱実験、と言う）。その結果、加熱実験においても地圧依存性・拘束圧依存性が計測され、大局的に見れば常温実験と類似の傾向を示した。一方で、緩衝材が膨潤を開始したと思われる時点以降では、いずれの計測結果も常温実験とは明らかに異なる挙動が計測された。くわえて、実験中の間隙水の注入流量に着目すると、実験経過時間数百時間後、常温実験では計測されていない流量変化が生じていた。また、加熱実験終了後、模型のX線CT撮影を行い、オーバーパック周辺の緩衝材密度が常温実験より低く飽和密度に達していない結果が得られた。すなわち、高温の廃棄体が緩衝材中の間隙水分布に影響を与え緩衝材の密度が低下、これにより緩衝材の土圧と処分孔内の剛性が低下し、地圧一定条件であるために周辺岩盤のひずみと廃棄体の変位傾向に変化が生じたと考える。

キーワード：地層処分、長期挙動評価、遠心力模型実験、力学的相互作用

Keywords: Geological disposal , Long term behavior evaluation , Centrifuge model test ,
Geomechanical interaction

高速増殖原型炉もんじゅ付近の花崗岩に見られる並走粘土脈を含む小規模破碎帯の活動性評価例
An example of activity evaluation of a minor crush zone including subparallel clay veins in granite near the Monju site

*島田 耕史¹、石丸 恒存¹、末岡 茂¹、照沢 秀司¹、安江 健一¹、丹羽 正和¹、梅田 浩司¹

*Koji Shimada¹, Tsuneari Ishimaru¹, Shigeru Sueoka¹, Shuji Terusawa¹, Ken-ichi Yasue¹, Masakazu Niwa¹, 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

はじめに：重要構造物付近の破碎帯の露出状況は多様であり，上載地層法が適用できない場合の活動性評価手法の整備が必要である。上載地層法は交差切りの法則を用いており（例えばMarshak, 2001），この法則に基づく基盤岩中の構造の切断関係による活動性評価手法は有望である。しかしながら，露出状況による制約や破碎帯自体の特徴として，切断関係が見られない小規模な破碎帯もある。ここでは，そのような事例として，一つの破碎帯露頭を取り上げ，活動性評価例を示す。

破碎帯露頭の概要：福井県敦賀半島北部のもんじゅの南西に位置する破碎帯露頭では，北西に流下する沢の滝の直下，左右両岸の花崗岩中に，走向傾斜N30E60E前後，幅数10cm，露頭延長20m弱の破碎帯が見られる。部分的に土被りで数m露出しない。破碎帯中に幅数cm以下で粘土化が進んだ複数のせん断面が見られ，一部並走している。これらを，左岸（南）側の長いものからb1-b3，右岸（北）側のb4とする。b1は比較的軟質な粘土脈が連続し，南で直線性が高く，北に向かって直線性を減じ，沢沿いで北北東走向から北北西走向へ大きく屈曲する。b2はb1の上盤側に位置し，b1と異なり沢沿いで直線性が高いが南で尖滅する。b3はb1の下盤側に位置し，連続性が悪く，露頭上部の東側が高い花崗岩の段差（以下「段差」という。）の一部を構成し，b1と共に厚い堆積層で覆われている。b1とb2，b1とb3は，互いに並走し，全体として右雁行状に配列しており，交差してどちらかに変位を与える様子は確認できない。破碎帯の上盤の花崗岩は高さ数mのオーバーハングした地形を作る硬い岩盤であるのに対し，下盤は角礫化し脆い。右岸側の露頭を横断するb4は複数の粘土脈薄層のうち連続性の良いものであり，部分的に軟質である。

検討方法と結果：方法1；地形地質的延長部の確認。変動地形は見られず，b4の北方の花崗岩の連続露頭に破碎帯の延長部は見られない。方法2；評価対象の選択と火山灰分析による堆積層の年代の推定。連続性を重視しb1を選択した。b1を覆う堆積層に変位変形は見られず，b1直上から火山ガラスは検出されないが，約20m離れた一連の堆積層からAT火山灰起源の粒子が産出する。方法3；露頭，研磨片，薄片観察による運動像の確認。b1，b2，b4はいずれも正断層（東側落ち）成分を含み，横ずれ成分は左右両方が見られる。b3は変位センズの指標が見られないが，b3と堆積層に挟まれた固結した葉片状粘土状破碎部にはいずれ正断層運動（東側落ち）を示す構造が見られる。b3付近の段差に沿った堆積層中の礫の定向配列は見られない。方法4；基盤岩の段差の類似例の調査。別の沢沿いの露頭で，花崗岩中の破碎帯の粘土化部が突出し，周囲の脆弱な角礫化部が削られ，差別侵食により局所的な段差を形成する現世の事例が見られる。方法5；活断層との粒径分布の比較。付近の白木-丹生断層（南北走向高角度東傾斜の逆断層）とb1の粘土の粒径（mode）は，白木-丹生断層では0.584 μ m，b1では3.91 μ mである（Niwa et al., submitted）。

破碎帯の活動性（解釈）：方法1から，破碎帯は変動地形を伴う活断層ではなく，分布が途切れる小規模破碎帯である。方法2から，堆積層は約3万年前以降に堆積しており，白木-丹生断層の最新活動時（約9,000年前以降）の付随的な運動の痕跡はない。方法3から，この破碎帯は現在の活断層と異なる運動像を伴う複数の活動時期を経験しており，堆積層との境界の段差はせん断で生じたものではない。方法4から，堆積層との境界の段差は花崗岩の角礫化部の侵食によって生じ，後に堆積層が埋積したと推定される。方法5から，b1は粉碎の程度が弱く，累積変位量が活断層に比べ小さく小規模な破碎帯であることが補強される。これらの情報は，この破碎帯が，起震断層の運動が直接地表に現れた活断層ではなく，活断層に付随してずれ動く弱面としても機能していないことを示す。ポスターでは，屈曲するb1と直線的なb2の構造的関係の検討結果も議論する。

【引用文献】 Marshak, S. (2001), Earth: portrait of a planet.

キーワード：破碎帯、高速増殖原型炉もんじゅ、花崗岩

Keywords: crush zone, fast breeder reactor "Monju", granite

3Dレーザースキャナーによる治山ダムの放射性セシウム堆積量の変化の推定

Estimate of variation of radioactive cesium sedimentation in a soil saving dam with the 3D laser scanner

*渡辺 貴善¹、大山 卓也¹、石井 康雄¹、新里 忠史¹、阿部 寛信¹、三田地 勝昭¹、佐々木 祥人¹

*Takayoshi Watanabe¹, Takuya ohyama¹, yasuo ishii¹, Tadafumi Niizato¹, hironobu abe¹, katsuki mitachi¹, yoshito sasaki¹

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の事故で放出された放射性セシウムが沈着した森林の大部分は未除染のままであるため、森林から生活圏へ放射性セシウムが流出し、生活圏の再汚染の懸念がある。本報告では、森林から流出する放射性セシウム量を推定するために、土砂移動に伴う放射性セシウム流出量が最も高いと見込まれる地形の急峻な山地森林を対象として、土砂堆積量と土砂の放射性セシウム濃度を測定し放射性セシウム流出量を算出するとともに、日雨量との関係について考察した。

阿武隈山地に位置する治山ダムにおいて、ダム上流側を3Dレーザースキャナーで繰り返し計測することで堆積量の変化を調べた。3Dレーザースキャナーを用いた土砂移動の計測では、試験斜面枠のような常設の観測装置を必要とせず、数時間の作業で数百万点の座標が得られることで詳細な地表面モデルを作成することができる利点がある。調査対象の治山ダムは、治山ダムを流出口にもつ流域の面積は2.1 ha、第6次航空機モニタリング（2012年11月時点）によるCs-137の流域内における沈着量は約3000 kBq/m²であり、植生は広葉樹とスギの混交林である。また、ダム上流部分は、越流放水路の高さから1 m程度下までしか堆積しておらず、満砂状態でないことから、上流からの土砂は治山ダムによりすべて捕捉されていると考えられた。計測は2013/8/29、2014/12/3、2015/9/2及び2015/12/1に、同一領域を繰り返し測定した。

計測した点群データから樹木などの堆積物以外のものを除去したのち、計測範囲を5 cm 幅の角柱状に区分し、各領域の最低点を抽出することで、地表面の点群データセットを作成した（面積18 m²）。この点群からTINメッシュにより地表面モデルを作成した。4回の計測で得られた地表面モデルの差分から治山ダムに堆積した土砂量を求めた。

計算の結果、2013/8/29～2014/12/3（以下、期間①）に0.5 m³、2014/12/3～2015/9/2（以下、期間②）に0.1 m³、2015/9/2～2015/12/1（以下、期間③）に1.8 m³の土砂の増加が見られた。また、本調査地において円筒形土壌採取器を用いて採取した堆積土砂（5 cm 深度）の放射能濃度の平均は、Cs-137：300 kBq/kg であることから、堆積土砂の密度を1 g/cm³と仮定すると、2013年～2015年の27か月間に治山ダム内に堆積したCs-137は720 MBqと推定された。これは、流域に沈着している放射性セシウムの1%程度が27か月間に流域の森林から流出し、治山ダム内に堆積したことになる。とくに、そのうちの75%が、期間③に集中する結果となった。年間の土砂堆積量は1 m³程度であり、流域に沈着している放射性セシウムの0.5%が1年間に治山ダムへ流入したと見積もられた。

土砂流出はUSLEなどの雨量や土地の被覆などの関数としてモデルが作れている（Wischmeier & Smith; 1978, Hillel; 2004）。本調査の流域は保安林に指定されているものの、混交林に被覆されており、平時における森林からの土砂流出は少なく、大雨時の影響が大きいと考えられる。本調査地に最も近い気象庁アメダス観測点「津島」の観測データでは、日雨量が年平均雨量1350 mmの5%（67.5 mm）を超える日が期間①に6日、期間②に1日、期間③に3日あった。2013年の日雨量の最大は94mm、2014年は89.5mmであるのに対して、2015年9月に114 mmと171 mmの降雨があった。よって、対象の治山ダムでは、日雨量が年平均降水量の5%を超える雨により森林から治山ダムへ放射性セシウムの流入が増え、日雨量が100mmを超える雨の時に大きく増加することが考えられる。

気象庁ホームページ過去の気象データ・ダウンロード<http://www.data.jma.go.jp/gmd/risk/obsdl/index.php>
Wischmeier, W. H., Smith, D. D., Predicting rainfall erosion losses -a guide to conservation planning., Agriculture Handbook No. 537. (1978)

Daniel Hillel, Introduction to Environmental Soil Physics, Elsevier(USA) (2004)

キーワード：福島第一原子力発電所事故、3Dレーザースキャナー

Keywords: accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, 3D laser scanner