

セメントへのセシウムイオン吸着に関する分子動力学を用いた研究 Molecular Dynamics Study of Adsorption States of Cesium Ion in Cement Matrix

小林 和弥^{1*}, 梁云峰¹, イアン・ボーグ², 松岡俊文¹

Kazuya Kobayashi^{1*}, LIANG, Yunfeng¹, BOURG, Ian², MATSUOKA, Toshifumi¹

¹ 京都大学工学研究科, ² ローレンスバークレー国立研究所地球科学

¹Kyoto University, Faculty of Engineering, ²Lawrence Berkeley National Laboratory, Earth Sciences Division

原子力発電に伴って発生する Cs^+ イオンは半減期の長さやその可動性から、セメントによる固定が期待されている。一般にセメントは微視的に複数のナノクリスタルの集合体と考えられ、 Cs^+ イオンのナノクリスタルに対する吸着は固定の安定性を評価するために重要であるといえる。本研究ではふたつの主たるセメント結晶構造であるトバモライト、ジェナイトに対する CsCl 溶液と NaCl 溶液それぞれの界面における分子動力学シミュレーションを行い、イオン吸着における結晶の構成原子、構造の影響、イオンの吸着状態について評価を行った。シミュレーション結果は Cs^+ イオンと Na^+ イオンにおける吸着状態を明らかにし、 Na^+ イオンはハイドレーションシェルの内側での吸着であるインナースフィア型、ハイドレーションシェルの外側の吸着であるアウトースフィア型吸着の両方を行い、 Cs^+ イオンではインナースフィア型の吸着のみ観察された。またトバモライトはジェナイトよりもイオン吸着特性が優れていることが示唆された。この結果からセメントイオン固定についてより深い議論が進むことが期待できる。

キーワード: 放射性廃棄物処分, セシウムイオン固定, イオン吸着, 分子動力学

Keywords: Geological Disposal, Cs Fixation, Ionic Adsorption, Molecular Dynamics

日本の花崗岩に適した化学的風化指標 Chemical weathering index suitable for Japanese granitic rocks

亀井 淳志^{1*}
Atsushi Kamei^{1*}

¹ 島根大学大学院総合理工学研究科地球資源環境学領域
¹Department of Geoscience, Shimane University

岩石の化学的風化作用は主に水 - 岩石反応で進行する (Nesbitt, 1979; White and Brantley, 1995)。この反応過程では、Na や Ca などのアルカリ金属・アルカリ土類金属元素が溶脱し、残留元素は二次鉱物や難溶性鉱物に分配される (Reiche, 1943; Vogel, 1975; Nesbitt et al, 1980; Nesbitt and Young, 1982; Harnois, 1988)。このシステムは全岩化学組成を用いた岩石の化学的風化度を測定する手法として用いられ、現在までに 30 以上の指標が提案されている (Duzgoren-Aydin et al., 2002)。

花崗岩類は大陸地殻を構成する主要岩石であり、ゆえに花崗岩類を対象とした風化指標の研究は数多い (Ruxton, 1968; Vogel, 1975; Harnois, 1988)。この指標は地質学、環境科学、土木工学などの様々な分野に関連が深い (Hencher and McNicholl, 1995; Irfan 1996; Nesbitt and Markovics, 1997; Panahi et al., 2000)。ただし、そのほとんどが新鮮なコアストーン ~ 風化殻に至る連続試料やボーリングコアを使用し、限られた狭い範囲の事例研究に留まっている (Nesbitt and Markovics, 1997; Guan, et al., 2001; Kirschbaum, et al., 2005)。したがって、比較的広い範囲から採取された花崗岩類の風化度を正確に見積もることは難しい (Kamei et al., 2012)。

岩体もしくは地質体の規模でみる風化花崗岩の化学組成とは、マグマ活動に由来する初生的な組成変化の上に、様々な程度の風化作用による組成変化が重複した複雑なものである。優れた化学的風化指標とは、幅広い岩石に有効であり、かつ新鮮な岩石と風化岩石とを明瞭に区分できるものと定義されている (Fedo et al., 1995; Price and Velbel, 2003)。Kamei et al. (2012) は、既存の風化指標に岩石学的な考察を取り入れ、風化指標からマグマ活動に伴う組成変化の影響を除去する手法を提案した。これにより、初生的に化学組成が異なる様々な花崗岩類の化学的風化度を同一基準で比較可能となった。

本発表では、Kamei et al. (2012) の方法に基づき、日本の花崗岩に最適な化学的風化指標を特定する検討を行った。その結果、CaO および Na₂O を溶脱元素とし、Al₂O₃ を残留元素と設定した指標が機能的であることが示された。これらの元素は、花崗岩中の斜長石の主要元素である。日本の花崗岩の風化作用を議論した報告では、風化作用に敏感な鉱物として斜長石と黒雲母が重要であることが知られている (三浦, 1973; 北川, 1999; 福士ほか, 2000; 歌田, 2003; Yokoyama and Matsukura, 2006; Kamei et al., 2012)。一般に日本の花崗岩では、斜長石は黒雲母より多い。このことから、CaO, Na₂O, Al₂O₃ を使用した風化指標が最も機能的であることは、これらの事実と矛盾しない。以上より、日本の花崗岩に最も適した風化指標は CaO, Na₂O, Al₂O₃ からなる指標であると考えられる。

本研究成果は原子力安全・保安院「地層処分に係る地質情報データの整備」の一部として実施されたものである。

キーワード: 花崗岩, 化学的風化作用, 風化指標
Keywords: granitic rocks, chemical weathering, weathering index

堆積岩中の物質移動経路となり得る割れ目の構造とその特徴—幌延深地層研究所における事例—

Formation and the feature of Flow-path fractures in a sedimentary rock - A Case study at Horonobe URL -

横田 秀晴^{1*}, 吉田 英一²Hideharu Yokota^{1*}, Hidekazu Yoshida²¹ 日本原子力研究開発機構, ² 名古屋大学博物館¹ Japan Atomic Energy Agency, ² Nagoya University Museum

高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価の観点では、岩盤中の物質移動特性を理解することは最も重要な項目の一つであり、そのためには岩盤中で物質の移動経路となる割れ目の特性を把握する必要がある。割れ目の構造と物質移動経路としての特徴に関する研究は、結晶質岩においては、瑞浪超深地層研究所や地下貯留などの分野においても例があるものの、堆積岩における例は少ない。そこで本研究では、日本原子力研究開発機構が北海道北部の幌延町で実施している幌延深地層研究計画における調査研究のうち、換気立坑で実施した壁面の地質観察（深度 250.5m ~ 350.5m の鉛直 100m 区間）結果の解析により、幌延地域の新第三系堆積岩における実際の地下での割れ目の構造、分布、性状、連続性の把握を試みた。また、東立坑から採取した岩石試料を用いて、割れ目を充填する炭酸塩鉱物の観察、元素マッピング、Sr 同位体分析を実施し、それらの結果と幌延地域の構造発達史から物質移動経路の形成過程を考察した。以下では、断層岩類を伴う割れ目を「断層」、それ以外を「開口性割れ目」とし、単に「割れ目」とした場合は両者を併せたものを指す。

換気立坑の対象区間には一様な珪質泥岩からなる新第三系の稚内層が分布する。この区間は従来の調査研究から多くの連続的な割れ目が把握され、割れ目の研究に適している。立坑の掘削では、深度 250m まで立坑を掘削した状態で、深度 380m 程度までを対象に湧水抑制のためのグラウト施工が実施された。改良範囲は立坑壁面の奥側約 1.5m までである。グラウト材は連続的な割れ目を伝って充填されるため、本研究では物質移動経路としてグラウト材が充填された割れ目に着目した。

観察の結果、割れ目の総数は 4528 本で、そのうち、掘削影響により形成された割れ目を除いた数は 3029 本であった。グラウト材が充填された割れ目は 3029 本中 954 本であり、グラウト材は断層における断層岩類と周辺母岩との境界や一部の開口性割れ目に充填が認められた。割れ目計数の重複を避けるため、およそ NE-SW 走向の割れ目が卓越して分布することを考慮して立坑壁面の NW 方向に鉛直の計測ラインを設定し、それと交差する割れ目を計測した結果、全割れ目 183 本（掘削影響による割れ目除く）のうち、グラウト材が充填された割れ目は 41 本（22.4%）で、それらは主に N70 ~ 80 °E60 ~ 80 °N と水平に近い低角に集中した。また、グラウト材が充填された割れ目の鉛直方向の分布頻度は、断層で 0.04 本/m、開口性割れ目で 0.37 本/m となった。グラウト材が認められない割れ目の分布は N70 ~ 80 °E60 ~ 80 °N と N45 °W45 °S あたりに主に集中する。後者は層理面とほぼ同じ姿勢である。前者はグラウト材が充填された割れ目と同じ集中を示すことから、本地域の地質構造に支配された物質移動経路が存在することを示唆する。なお、グラウト材に充填された開口性割れ目の薄片観察では、母岩とグラウト材の間にシャープな境界が認められ、グラウト注入によるせん断破壊の痕跡は認められなかった。

一方、換気立坑近傍の東立坑の稚内層において認められた炭酸塩鉱物脈に充填された割れ目は、肉眼観察の結果、せん断性をもつ開口性割れ目で、それを充填する炭酸塩鉱物に晶洞と自形結晶が確認され、薄片観察では割れ目の開口部の空間で母岩側から中心部に向かう結晶の成長が認められた。また、それとは不連続なタイミングで結晶化した方解石が前述の自形結晶と母岩の割れ目面との間に観察された。また、元素マッピング結果は方解石が均質で割れ目面とシャープな境界を成すことを示し、同位体分析の結果は割れ目の周辺部と中心部の方解石が同一の地下水により形成されたことを示唆した。以上より、物質移動経路は空隙をもつ割れ目が形成されることにより発生し、連続的な地質環境の変遷の中でその空隙形成には少なくとも 2 段階のステージの存在が示された。また、ステージ間は時間間隙が小さいまたは連続的に推移したと考えられ、一様に存在した地下水は形成される物質移動経路に継続的に流入し、充填が早く生じたと推測される。

以上の結果から、物質移動経路形成ステージと既存の研究による本地域の地質構造発達史との関連を考察した。堆積盆の沈降に伴う圧密続成作用と東西圧縮場での応力による東西走向の割れ目の形成段階と、その後の褶曲構造の発達と隆起に伴う応力解放による割れ目の再動とそれによる開口性割れ目の形成段階が見いだされ、段階的な物質移動経路形成が明らかとなった。

本研究により、本地域の物質移動経路形成過程が明らかとなった。今後、割れ目の規模と連続性の関係やその分布範囲を整理し、堆積岩地域における物質移行経路の構造とその長期変遷の理解に反映していく。

Japan Geoscience Union Meeting 2013

(May 19-24 2013 at Makuhari, Chiba, Japan)

©2013. Japan Geoscience Union. All Rights Reserved.



SCG60-03

会場:国際会議室

時間:5 月 21 日 16:45-17:00

キーワード: 物質移動経路, 割れ目, 堆積岩, 幌延

Keywords: Flow-path, fracture, sedimentary rock, Horonobe

花崗岩体を対象とした亀裂のマルチスケール解析と地下水流動推定への応用 - 東濃地域におけるケーススタディ - Multiscale Fracture Analysis and Regional Groundwater Flow Estimation of a Granitic Body: a Case Study of Tono Area

久保 大樹^{1*}, 松田 典大², 柏谷 公希¹, 小池 克明¹

Taiki Kubo^{1*}, MATSUDA, Norihiro², Kouki Kashiwaya¹, Katsuaki Koike¹

¹ 京都大学大学院工学研究科, ² 京都大学工学部

¹ Graduate School of Engineering, Kyoto University, ² Faculty of Engineering, Kyoto university

地殻の工学的利用に関する様々な分野において、地下深部の水理構造を適切に把握することが求められている。とりわけ地層の貯留機能を応用する地層処分計画では、その安全性評価のために対象地域の広域的な地下水流動形態を明らかにする必要がある。花崗岩に代表される難透水性の岩体中においては、断層や節理などの亀裂構造や風化・変質帯が高透水性ゾーンとして機能し、地下水流動の支配的要素となることが知られている。こうした地質特性と岩石の透水性の関連性を明らかにした上で、その空間分布を推定することにより、地下深部の水理構造をより詳細に把握することが可能となる。

本研究では、岐阜県東濃地域を対象地域に選び、実験的・数値解析的手法によりマルチスケールで岩石の透水性と地質特性との関連性を明らかにし、広域的な地下水理構造を把握することを目的とした。本地域は、土岐花崗岩と呼ばれる白亜紀後期の花崗岩を基盤岩とする。はじめに、広域的な亀裂分布形態を明らかにするために地球統計学的シミュレーション法である GEOFRAC (Koike *et al.*, 2012) を適用した。さらに、対象地域で取得された複数のボーリングコアを試料として、浸透率測定と画像解析による微小亀裂の特性評価を行った。浸透率測定では、岩石の風化・変質の程度に対応する透水性の変化が明らかになった。さらに、亀裂面に近づくにつれて透水性が増加する傾向や、微小亀裂の卓越方位と調和した透水異方性の存在が確かめられた。微小亀裂と浸透率の卓越方位は、GEOFRAC によって得られた広域シミュレーション亀裂の配向性とも調和的であり、異なるスケールで共通する亀裂配向性の存在が示唆される。このような亀裂配向性を生じさせる要因として、広域応力場や断層運動が考えられる。

対象地域では、ボーリング孔を利用した透水試験が行われている。これによって得られた透水係数と近傍のシミュレーション亀裂の面積を比較すると、正の相関関係が存在することが確認された。この相関関係から求められる透水係数を GEOFRAC による亀裂分布モデルに割り当て、地球統計学の一手法である逐次ガウスシミュレーションを用いることで、東西 12 km、南北 8 km、深度方向 1.5 km の 3 次元透水係数分布モデルを構築した。この透水係数分布モデルに、3 次元差分法を用いた地下水流動解析モデルである MODFLOW を適用し、対象地域における広域的な地下水流動シミュレーションを実施した。シミュレーション結果より、連続性のよいシミュレーション亀裂として表現される断層周辺での地下水流動の異方性が明らかとなった。

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。

参考文献

Koike, K., Liu, C., Sanga, T. (2012): Incorporation of fracture directions into 3D geostatistical methods for a rock fracture system, *Environmental Earth Sciences*, vol. 66, no. 5, pp. 1403-1414.

キーワード: 亀裂構造, 地球統計学, 地下水, 透水係数, MODFLOW, 土岐花崗岩

Keywords: fracture system, geostatistics, groundwater, hydraulic conductivity, MODFLOW, Toki granite

東濃地震科学研究所地域における応力と地下水の関連性について - 間隙弾性体を考慮した考察—

Relationship between stress and groundwater around TRIES area - consideration taking into account poroelasticity -

石井 紘^{1*}, 浅井 康広¹

Hiroshi Ishii^{1*}, Yasuhiro Asai¹

¹ 地震予知総合研究振興会 東濃地震科学研究所

¹Tono Research Institute of Earthquake Science (TRIES) ADEP

東濃地震科学研究所では深部ボアホールで連続観測可能な応力計や総合観測装置を開発している。現在、研究所周辺の10km四方の地域に約15カ所のボアホール観測を実施し、地殻変動や地下水の振る舞いなどを調べている。研究所の近くには原子力研究開発機構(JAEA)が直径6.5mと4.5mのそれぞれ主立坑と換気立坑を掘削している。両立坑は40m離れており、立坑はステージと呼ばれる横坑で繋がっている。200m深度のステージに約20mのボアホールを掘削し応力計と水圧計を設置しデータを蓄積している。この立坑の近くにはNNW断層が存在している。遠い地震でもある程度以上の大きさの地震が発生すると水圧計は圧力が増加し、応力計は圧縮応力が減少し、長期的に最初の状態に戻っていくことが観測されている。このような現象はNNW断層や地下水の流動と関連していると考えられる。水圧計と応力計は同じボアホールに設置されているので興味あるデータが得られる。立坑内の工事で湧水が発生するとこれらの計器はそれに伴う変化を記録する。その変化は応力計の鉛直成分と水圧計で同じ変化量を示すことから開発した応力計は応力を正確に記録し検定も正しく行われていることが明らかである。2011の3.11地震による地震波も水圧計と応力計の鉛直成分で全く同じ波形を記録している。しかし極性は逆で水圧計が圧力増加の時に応力計は圧力減少を示す。振幅は応力の方が2倍大きい。また、時間的には水圧計は0.35秒遅れて変化している。このほか潮汐変化や長期的変化などの比較した結果も考慮して地下水の振る舞いと応力変化の関連や間隙弾性体の性質について検討した結果を報告する。

キーワード: 応力計, 水圧計, 地下水のふるまい, 間隙弾性体

Keywords: stressmeter, water-pressure gauge, behavior of groundwater, poroelasticity

震源断層周辺のヘリウム同位体比の分布：活断層の調査・評価技術の構築に向けて Geographic distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios along seismic source faults in Japan

梅田 浩司^{1*}, 浅森 浩一¹, 草野 友宏¹

Koji Umeda^{1*}, Koichi Asamori¹, Tomohiro Kusano¹

¹ 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門

¹ Geological Isolation Research and Development Directorate, Japan Atomic Energy Agency

It is well known that mantle degassing does not occur homogeneously over the Earth's surface. The elevated $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios found in volcanic regions and tectonically active areas are higher than the atmospheric values. This distribution is interpreted to indicate transfer of mantle volatiles into the crust by processes or mechanisms such as magmatic intrusion, continental underplating and lithospheric rifting. This study was undertaken to elucidate the geographic distribution of $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios around seismic source faults in Japan, using helium isotope data obtained from gas samples. Several case studies suggest that there is a significant trend of high ^3He emanations along the trace of active faults, resulting in leakage of mantle volatiles through crustal pathways (faults) due to more frequent development of higher permeability pathways and/or upwelling of mantle fluids through the ductile lower crust. From the viewpoint of site selection and implementation of a geological disposal facility, helium isotopes may be regarded as a tool for investigating and/or mapping concealed active faults with no surface expression.

Keywords: helium isotope, active fault