

地下水流動経路としての割れ目からの各種情報の取得とその評価に関する基礎研究—屋久島の離水サンゴ周辺の割れ目を対象として—

Fundamental Study on Mineralogical and Chemical Properties of Rock Fractures as a Pathway of Groundwater –Case Study for Yakushima Granite

長田 昌彦^{1*}, 松下 智昭², 竹村 貴人³, 高橋 学⁴

Masahiko Osada¹, Tomoaki Matsushita², Takato Takemura³, Manabu Takahashi⁴

¹埼玉大学 地圏科学研究センター

Geosphere Research Institute, Saitama University

²埼玉大学大学院 理工学研究科

Graduate school of Science and Engineering, Saitama University

³日本大学 文理学部

College of Humanities and Sciences, Nihon University

⁴(独) 産業技術総合研究所

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

Abstract

Rock fractures as a pathway of groundwater have been altered either physically or chemically, and filled with minerals or other fillings depending on circumstances. In this paper, we describe mineralogical and chemical properties of fractures observed in Yakushima granite, along which the wall rocks are solidified. Microscopic observations and EPMA analyses of the solidified part show that cracks are filled with fragments of different kinds in matrix of amorphous calcium carbonate. It is presumed that the calcium carbonate was provided from corals uplifted. This is supported by the results of the radioactive dating that the ages of fillings are always younger than those of the coral.

Key Words : *Yakushima granite, coral, fracture fillings, radioactive dating*

1 はじめに

放射性廃棄物の地層処分では、放射性物質の生物圏への移行過程の評価がその安全性を検討するうえで重要な課題となっている。長期間のうちに地下深部に存在する地下水によってガラス固化体から放射性物質が溶け出し、地下水によって生活環境に運ばれる可能性、いわゆる地下水シナリオでは、地形変化や海水準変動による地下水流動の変化や地下水水質の変化も考慮することが必要とされている [1].

長期的な侵食と隆起による地形変化は、土被り厚や

勾配の変化などの境界条件の変化をもたらす広域的な地下水流動に影響を与えることが考えられている [1]. このような境界条件の変化に加えて、地下水が流れる器としての透水性そのものが変化する可能性もある。また海水準の変動は、同じく境界条件の変化をもたらす、地下水の流動と水質の変化および侵食速度の変化を生じることが考えられている [1]. 特に、沿岸地域や海域の地下では、塩水域と淡水域の分布が変化することも想定される。しかしこのような地形変化や海水準変動の影響評価は長期間を要するために、これらによって本当に地下水流動場の変化や地下水水質の変化が起こるのか、また起こるとしても野外においてどのようにして検出できるのかがはっきりしていないのが現状である。

* 〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

電話：048-858-3547 FAX：048-855-1378

Email: osada@mail.saitama-u.ac.jp

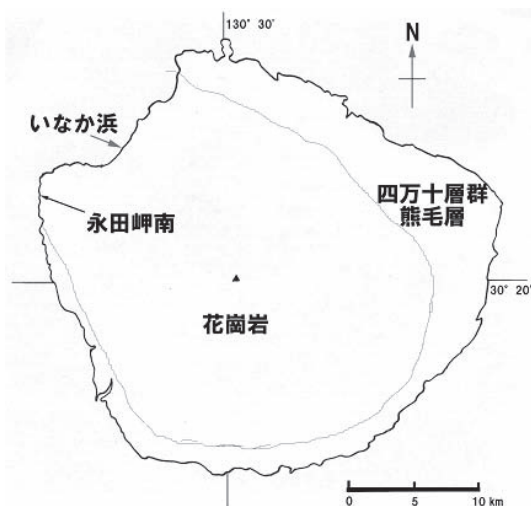


Fig. 1 屋久島の概要と調査地点

そこで本研究では、塩水から淡水への移行に伴う割れ目近傍での水-岩石反応についてナチュラルアナログ的に検討しておくことが重要であると考えて、離水サンゴ周辺の割れ目を対象として、割れ目に沿った鉱物学および化学的な変化傾向を検討することとした。

2 調査地域と対象とした割れ目

2.1 屋久島の地形と地質

屋久島は、九州南端から南へ約 60km に位置する周囲約 105km の円形の島である。島の中心部には九州最高峰の宮之浦岳（標高 1935m）がそびえ、他にも洋上のアルプスと呼ばれるように 1000m 級の山々が連なる。このような山々は地形性の降雨をもたらし、また夏から秋にかけては台風の通り道となることが多く、非常に降水量の多い島である。屋久島は亜熱帯地域に位置するため海岸沿いにはそのような植生が分布するが、山岳部では標高差により亜寒帯性のものが分布する。特に島の中心部には有名な屋久杉などが観察され、1993 年にユネスコの世界自然遺産に登録されている。

Fig.1 に屋久島の概略図を示す。屋久島は四万十帯に位置しており、島を取り巻くように四万十層群熊毛層が分布する。島の中央部は熊毛層群を貫くように中期中新世（14Ma）の屋久島花崗岩が分布しており、急峻な山岳地域を形成している。

屋久島花崗岩については、例えば R. Anma ら [2] に詳しく、主要造岩鉱物は、石英、斜長石、カリ長石、黒雲母であり、また数 cm 程度の正長石の巨晶が含まれるのが特徴的である。これらの正長石は風化に強く、母

岩よりも凸な状態となっているため、花崗岩表面は凸凹の大きな面となっている。安間ら [3] によると、正長石巨晶の配列は、岩体が冷却する過程で形成されたものであり、全体的に島の北西から南東方向の軸に対して、北西に開いた馬蹄形の良好な対称性を示す。

R. Anma ら [2] は、屋久島花崗岩を次の 4 つ

- Yakushima Main Granite: YMG,
- Core Granodiorite: CGD,
- Core Cordierite Granite: CCG,
- Marginal Facies Granite: MFG

に分類している。ここでは屋久島の北西に位置するいなか浜の花崗岩露頭を対象としており、YMG に分類される。YMG には微量鉱物として、白雲母、緑泥石、イルメナイト、ジルコン、アパタイトが含まれる。

2.2 対象とした割れ目

ここで対象とした割れ目が観察されたのは、島の北西に位置するいなか浜周辺である。通常の屋久島花崗岩中に発達する割れ目近傍は、Fig.2 のように、侵食により周辺の母岩よりも凹んでいる。一方、いなか浜周辺の割れ目には、Fig.3 に示したように、硬化して周辺の母岩よりも凸な構造となっているものが多く観察される [4]。



Fig. 2 凹んだ割れ目

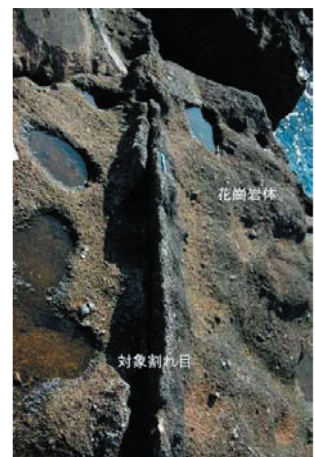


Fig. 3 硬化した割れ目

硬化した割れ目のうち新鮮なものは、Fig.4 のようにピンク色の充填物質が肉眼で観察される。塩酸をかけることによって発泡することから、炭酸塩であることは現地で確認できる。周辺を詳しく調査したところ、Fig.5 に示されるように、離水サンゴから岩盤割れ目中に脈が伸びていることを確認した。すなわち、いなか浜で観察された硬化した割れ目は、離水サンゴの存在と密接に関係していることがわかった。



Fig. 4 割れ目内を充填する物質

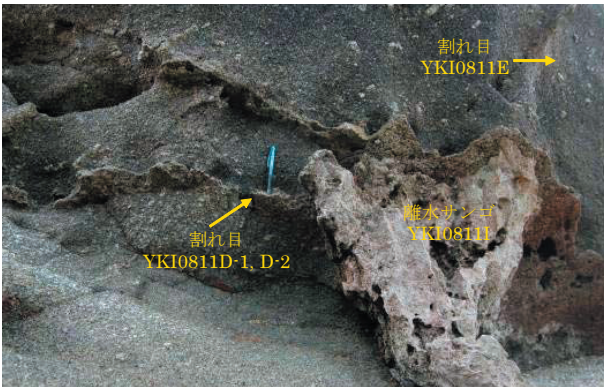


Fig. 5 離水サンゴとサンゴから伸びる脈

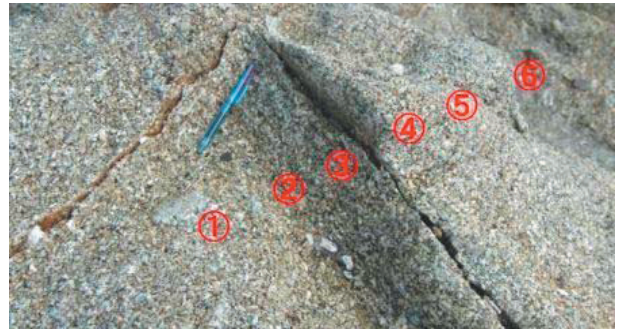


Fig. 6 硬さ試験を行った硬化した割れ目周辺

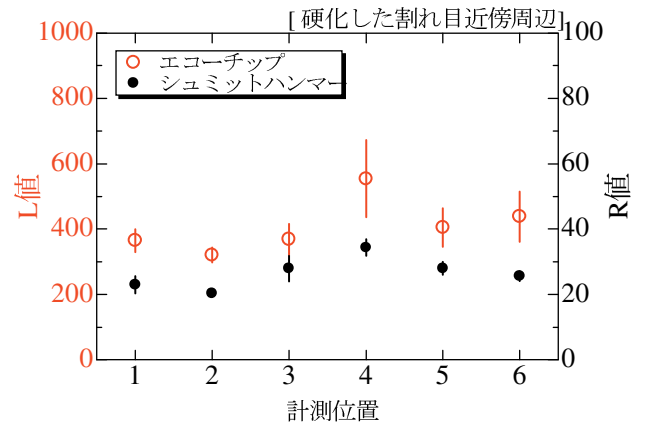


Fig. 7 硬さ試験結果

したがってサンゴの形成年代と割れ目充填物の年代を調べるとともに、割れ目充填物の構造を微視的に観察することにより、時空間的にどのように割れ目近傍での硬化が生じたのかを明らかにすることができる。

3 硬化した割れ目の力学的な評価

割れ目周辺が硬化していることを定量的に示すために、現地においてエコーチップ試験とシュミットハンマー試験を実施した。

まず、この2つの試験方法によって現地で硬度が確認できるかを確認するために、明らかに硬度差のあると推定される花崗岩中のたまねぎ状風化部においてこれらの試験方法を適用した。その結果、全体的に測定値のばらつきも少なく、予想通り外側にいくほど小さな値を示した。このように、シュミットハンマー試験およびエコーチップ硬さ試験機により、現地で簡便に対象物の硬さを定量化することができることを確認した。

次に、硬化した割れ目周辺2箇所硬さ試験を実施した。ここでは、そのうち Fig.6 に示した割れ目周辺

で実施した結果を Fig.7 に示す。図中の番号は測定位置を示す番号であり、3と4の間に割れ目があり、その近傍(3と4)が凸な構造となっている。2付近では割れ目と平行な方向にマイクロクラックが発達しており、周りの母岩より凹んでいる。1と6が母岩であり、5では2と同様に母岩よりもやや凹んでいる。なお1から6までは、60cm程度である。Fig.7において、L値がエコーチップによる硬度を示し、R値がシュミットハンマーによる硬度を示す。図には平均値をプロットするとともに、標準偏差をバーで示している。特に割れ目近傍である4の位置で有意に大きな値となっていることがわかる。現地で観察された岩盤表面の形状と硬さの分布が似たようなものとなっており、肉眼で観察される侵食による岩盤表面の凹凸は、ここで用いた簡便な方法によって定量的に表現しうるといえる。

以上の結果から、割れ目近傍が力学的に硬化していることが定量的に示された。

4 割れ目充填物の鉱物学および化学的検討 [5]

現地でサンプリングした試料を実験室に持ち帰り、偏光顕微鏡による鉱物学的な検討、および SEM/EPMA と XRD による化学的な検討を行った。

4.1 顕微鏡観察

採取した試料の中から薄片を作成し、偏光顕微鏡を用いて鉱物学的な検討を行った。なお本稿では、顕微鏡下で観察される亀裂を「クラック」と呼ぶこととし、現地で肉眼で観察される「割れ目」と区別して用いる。

一例を Fig.8 に示す。なお、ここに掲載した偏光顕微鏡写真はすべてクロスニコルで観察したものである。

a) はクラックに直交する方向のサンプル断面である。肉眼観察においても、クラック内を充填している物質が観察され、また様々な種類の碎屑物が混入しているのが観察される。この面に対して薄片を作成し、実体顕微鏡により撮影した画像が Fig.8 b) である。この図中に記されている□内は、Fig.8 c)– f) の位置を表している。Fig.8 c) では、クラック内を充填している物質は大部分が非晶質な物質（黒色となっている部分）であるが、筋上に結晶化しているような構造（白色部分）も観察される。サンゴの破片と推定される。Fig.8 d) より、クラック内に混入している碎屑物の中には、花崗岩を構成する鉱物以外のものも観察される。また Fig.8 e) のように、比較的幅の狭いクラックにおいては、クラック内には結晶化している部分も観察され、またクラック壁面に沿うように干渉色の高い析出鉱物が観察される。Fig.8 f) では、クラック幅に対して相対的に大きな碎屑物が侵入し、目詰まりのような現象を引き起こしている。

以上のような偏光顕微鏡による観察から得られた結果をまとめると、次のことが言える。

- クラックを充填しているマトリクスは非晶質物質であるか、結晶化していたとしても非常に小さい。
- クラックに含まれる碎屑物には、サンゴの破片など母岩である花崗岩起源以外のものも含まれる。
- 碎屑物は淘汰されておらず、磨耗していないものが多い。
- 碎屑物は幅の広いクラックを通して供給された。
- クラック内には間隙幅相当の大きさをもつ碎屑物を運搬するのに足りる流速があったと推定される。

4.2 化学分析

露頭での調査および顕微鏡観察結果から、硬化した割れ目を充填している物質の主体は、非晶質の炭酸塩であることがわかった。そこで次に、炭酸塩の種類および結晶度を調べるために、EPMA と XRD による化

学分析を実施した。

4.2.1 EPMA による元素マッピング

装置には、波長分散型 EPMA（日本電子社製：JXA-8800）を用いた。なお、元素マッピングを行う前に、対象領域内で定性分析を数点行った結果、Al, Ca, Mg, P, Si が認められたので、これらの元素に Fe を加えて合計 6 元素について元素マッピングを行った。

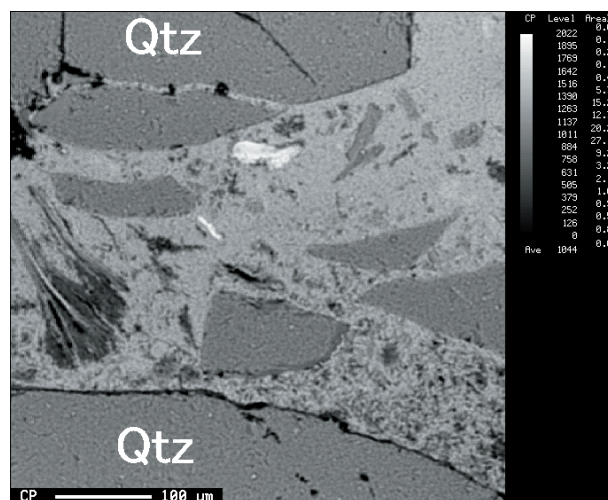


Fig. 9 EPMA 分析領域の SEM 画像 (組成像)

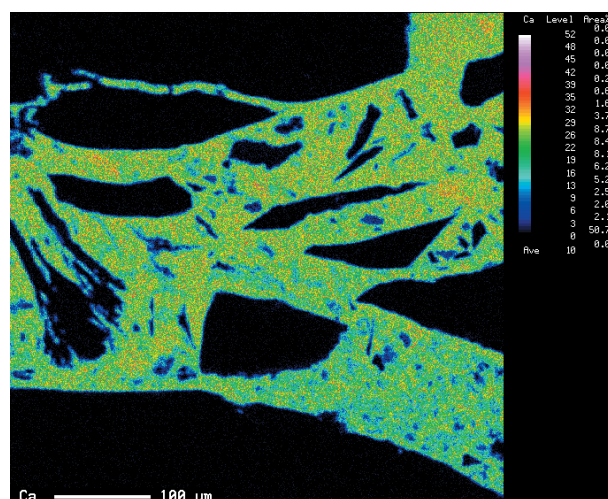


Fig. 10 Ca に対する元素マッピング結果 (EPMA)

測定結果の代表例を Fig.9,10 に示す。Fig.9 は、EPMA による元素マッピングを行った領域の SEM 画像 (組成像) である。組成像では、原子番号が大きい元素ほど反射電子をより多く放出するため、白いコントラストになる。図中の上下には比較的大きな石英粒子 (SiO_2 ; Qtz と略す) があり、クラックがその間を左右方向に走っている。クラック内の碎屑物としては多くの

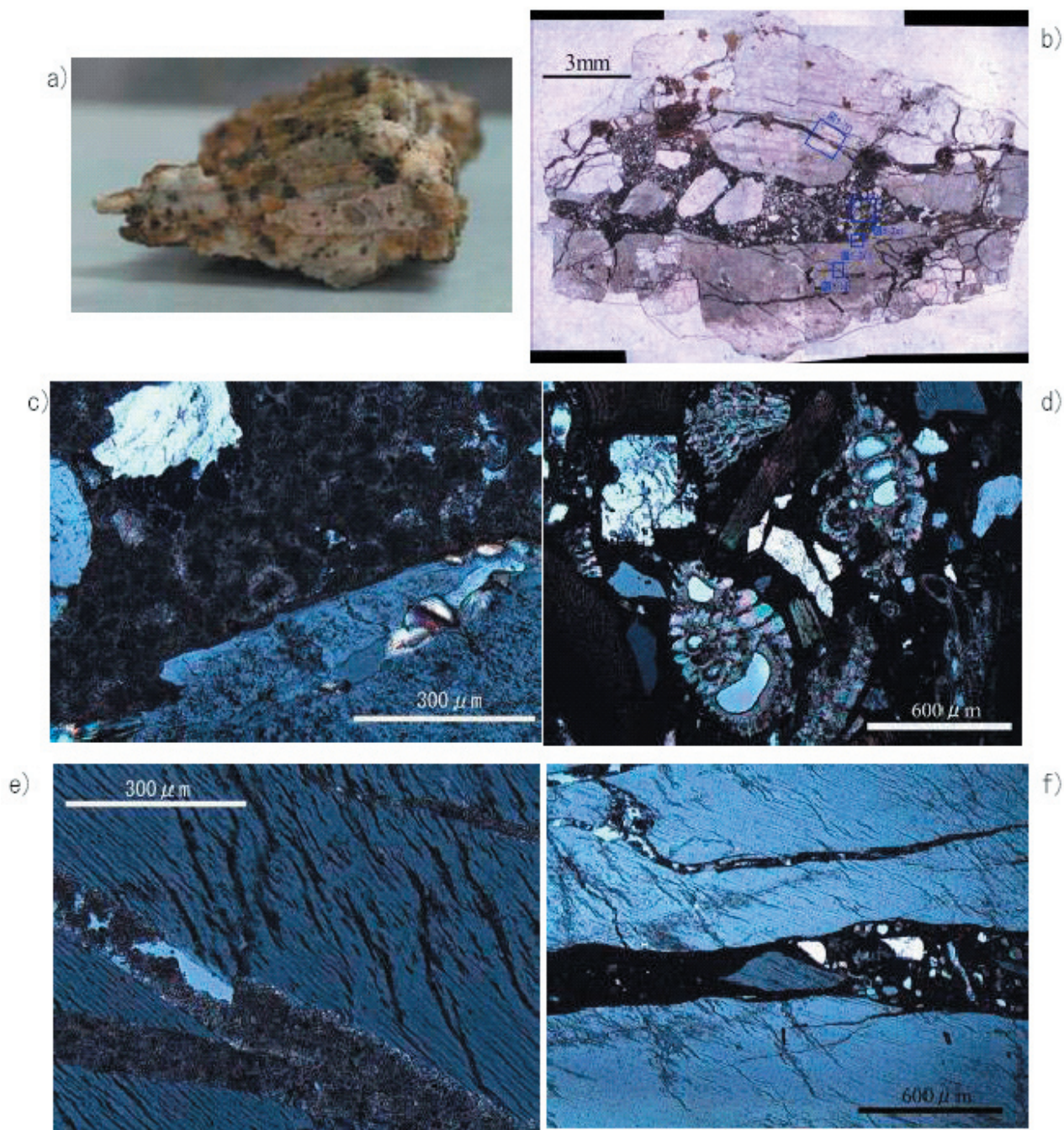


Fig. 8 偏光顕微鏡観察結果の一例. a) 割れ目に直交する方向の断面写真, b) 薄片試料の全体写真, c) 割れ目内充填物質：大部分が非晶質だが、白色で筋上の結晶化している部分（おそらくサンゴそのものの破片）もみられる. d) 割れ目内の碎屑物：外部から侵入したものが観察される. e) 相対的に幅の狭いクラック：壁面に白色の鉱物がみられる. f) 目詰まり：クラックの幅に対して大きな碎屑物により、目詰まりが生じている.

石英粒子が観察されるほか、白色部分（定性分析ではPの存在が確認されている）や樹枝状の物質も確認できる。Fig.10は、同領域におけるCaの元素マッピングである。クラック中のマトリクスを覆うようにCa含有量が高いことがわかる。SiとPは主に石英中に

分布しているが、Al, Mg, Feに関しては、全体に含有量が非常に少なかった。また図中の上部にある石英中の細かいクラックもCaで満たされていることがわかる。

以上の結果より、炭酸塩の種類は炭酸カルシウムであると推定される。

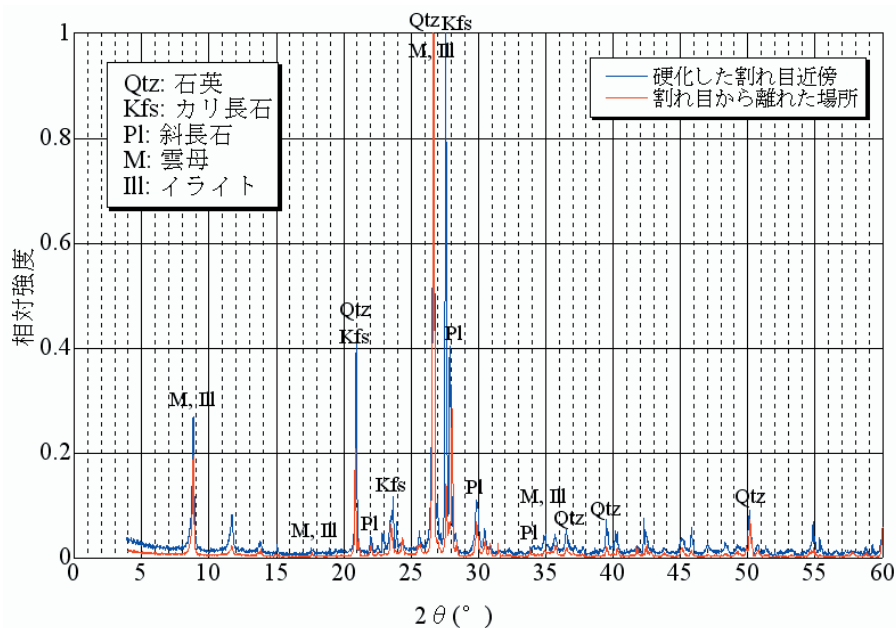


Fig. 11 XRD 分析結果. 横軸が回折角, 縦軸は回折強度の最大値を 1 とした相対強度.

4.2.2 XRD による組成鉱物の同定

装置は, X 線回折装置 (リガク製: RINT 2100S) を用いた. X 線は CuK α , 発散スリット・散乱スリットはともに 1°, 受光スリットは 0.15mm である. 測定した 2 θ 範囲は 4~60° で, 0.02° 間隔で測定した. 電圧, 電流はそれぞれ 50kV, 250mA である.

試料としては, 硬化した割れ目近傍から採取した試料とレファレンスとして母岩から採取した試料を準備した. 試料はメノウ乳鉢により粉末状にして分析を行った. なお, 屋久島花崗岩には数 cm 程度の正長石の巨晶が観察されるが, 今回の分析ではそのような大きな鉱物は含まれないようにした.

Fig.11 に XRD 分析結果を示す. 横軸は回折角, 縦軸は回折線の相対強度になっている. ここで相対強度とは, それぞれの試料において, 検出された回折強度の最も大きな値を 1 としたときの値となっている. 図より, 検出された鉱物は, 石英, カリ長石, 斜長石, 雲母, イライト (粘土鉱物) であり, Anma ら [2] の報告とほぼ一致する. しかし今回の分析では, 炭酸塩鉱物であるカルサイト (方解石) やアラゴナイト (霏石) は有意には検出されなかった. この結果は, 割れ目充填物質が非晶質であることを反映していると考えられるが, 今回の分析では XRD にかける粉末試料全体の量に占める割れ目充填物の量が少なかったために, 回折強度のピークが確認できなかった可能性がある. この点については, 今後割れ目充填物のみを抽出して分

析することで再確認したいと考えている.

5 離水サンゴと割れ目充填物の年代測定 [6]

離水サンゴはもとより, 割れ目充填物も炭酸塩であることから, 放射性炭素により各々の年代が測定可能である. 硬化した割れ目の産状から炭酸塩の起源はサンゴ由来と考えるのが自然であるが, 海水からの寄与も考えられる. このような炭酸塩の起源を検討するために離水サンゴおよび割れ目充填物の年代測定を行った.

放射性炭素年代測定は AMS (Accelerator Mass Spectrometry=加速器質量分析計) 法によった. 測定には, 3MV タンデム加速器をベースとした ¹⁴C-AMS 専用装置 (NEC Pelletron 9SDH-2) を用いた. ¹³C/¹²C の測定も加速器により同時に行っている. 年代値の算出には, Libby の半減期 5568 年を使用した. 暦年較正年代の計算には, ここで用いた試料は海洋起源であるとして, Marine04 Marine curve を使い, OxCalv4.0 較正プログラムを使用している.

本稿では, $\delta^{13}\text{C}$ 補正を施した暦年較正年代によって結果を示すが, 算出された暦年較正年代に関しては, 海洋リザーバー効果の地域差が大きいため, 算出値の絶対値にはさらなる検討が必要である. ちなみに今回測定した全 7 試料における $\delta^{13}\text{C}$ は, 1.27~4.10 ‰ の範囲にあり, 海洋性の貝殻などと同様に小さい値となっている.

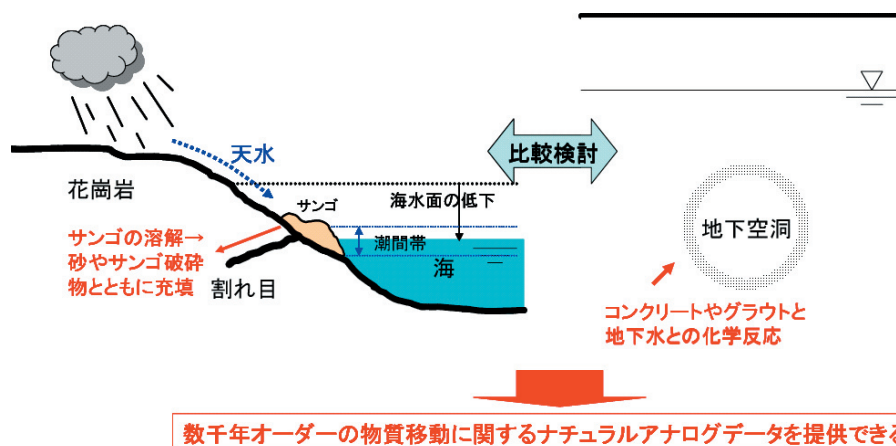


Fig. 13 観察された現象と放射性廃棄物処分事業とのつながり

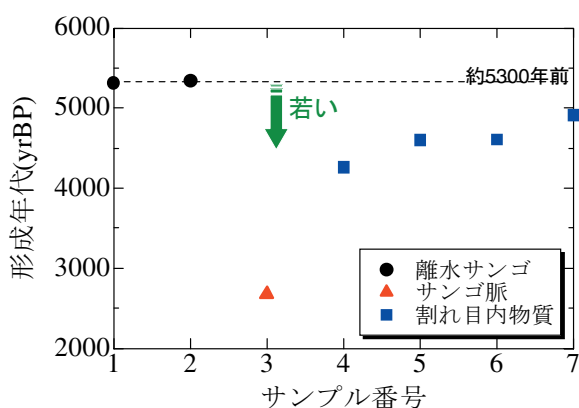


Fig. 12 AMS 年代測定結果

測定した7試料についての暦年較正年代を Fig.12 に示す。2つの離水サンゴそのもの(サンプル番号1,2)の形成年代は、それぞれ 5316 ± 36 yrBP, 5348 ± 36 yrBP であり、約 5300 年前に外部からの炭素の供給を絶ったものと推定される。ここで得られた離水サンゴの年代は、琉球列島でこれまでに得られている年代と整合的である。一方、割れ目充填物の暦年較正年代(サンプル番号3~7)は約 2680~4900 年前と幅をもっている。なお、サンプル番号3については離水サンゴから派生していることが現地でも確認されているので、図中ではサンゴ脈と記述している。ここで注目すべき点は、離水サンゴそのものと割れ目充填物の年代は異なり、常に充填物の方が若い年代を示すことである。上述した海洋リザーバー効果を考慮しても、新旧の相対的な関係は変化しない。

しかしながら単純に年代のみを比較してよいかは疑問が残る。年代測定から得られた $\delta^{13}\text{C}$ の値は、離水

サンゴで平均約 2% であるのに対して、割れ目充填物では平均約 3.6% と大きい。このような差は、例えば、炭素が移動していく段階で、重い ^{14}C と軽い C 元素では挙動が異なることを説明することが可能かもしれない。今後このような同位体分別の影響を考慮していく必要がある。

6 考察

6.1 硬化した割れ目の形成場の推定

およそ 1400 万年前の中期中新世に形成された屋久島花崗岩は、年間約 1mm という速さで相対的に隆起している。浅海で生育したサンゴは、この隆起に伴って離水したと考えられる。このことは、離水サンゴの形成年代である 5300 年前が琉球列島周辺の海水面が最高位に達する時期とほぼ一致することから妥当であると考えられる。

その後の海水面低下に伴いサンゴは離水し、降水により溶解が始まったと推定される。溶解した物質は水と一緒に岩盤割れ目内へ侵入し、沈着・固化した。その際に割れ目の中の水とともに碎屑物も侵入し、幅の狭い割れ目を通して母岩方向へ拡散していったものと考えられる。しかし溶解した物質が割れ目内に沈着・固化する過程には不明な点が多い。

6.2 観察された現象と放射性廃棄物処分事業とのつながり

天水と海水の混合によりサンゴが溶解し近傍の割れ目を硬化させた現象と類似の現象は、他でも報告されている。例えば新井ら [7] は、花崗岩質岩からなる野島断層破碎帯中に観察されるカルサイト脈の形成に寄与した流体は深部熱水ではなく、海水と天水の混合流体である可能性を示している。

Fig.13 に示したように、このような状況は放射性廃棄物の地層処分を実施した場合の周辺環境とも類似している。処分サイトは、地下 300m 以深の地下深部に建設されるため、地下水面下に位置することになる。また処分坑道の建設のためには、炭酸塩を主成分とするコンクリート吹付けやグラウトなどが行われる。地下 300m 付近の地下水水質は、天水と古海水との混合であることが報告されている ([8],[9],[10])。このような地下水環境下に炭酸塩を主成分とする人工材料がもたらされることによって、離水サンゴ直下で生じた現象と類似の現象が生じることが容易に推定される。したがって、離水サンゴ近傍で生じた現象を詳しく調べることによって、放射性廃棄物の地層処分事業に必要な数千年オーダーの物質移動に関するナチュラルアナログデータが提供できるものと期待できる。

またここで観察された現象は、自然が行った長期にわたるグラウト試験とみることもできる。地下水の流れがあるなかでの割れ目の充填プロセスを明らかにすることにより、例えばグラウトの止水メカニズムの解明にも役立つ可能性がある。

7 おわりに

離水サンゴの形成年代と割れ目充填物の年代を調べるとともに、割れ目充填物の構造を微視的に観察することにより、割れ目近傍での硬化が生じた原因について検討した。その結果、割れ目充填物は主に各種の碎屑物と非晶質の炭酸カルシウムであった。離水サンゴと割れ目充填物の年代は異なり、常に充填物の方が新しい年代を示しており、離水サンゴの溶解による可能性が大きい。このような現象を丹念に調べることによって、放射性廃棄物の地層処分プロジェクトに関連して、数千年オーダーの高精度のナチュラルアナログデータを提供できる可能性を示した。

なお本受託研究は、研究代表者の所属する埼玉大学地圏科学研究センター准教授・小口千明氏と同・(元)非常勤研究員・高屋康彦氏と共同で実施したものである。

謝辞 本研究は、(財)原子力環境整備促進・資金管理センターからの受託研究経費、「放射性廃棄物重要基礎技術調査研究」地下水水質への影響評価に関する基礎研究-地下水流動経路としての割れ目からの各種情報の取得とその評価に関する基礎研究-によって実施されたものの一部である。EPMA 分析および XRD 分析については、日本大学文理学部地球システム科学科所有の装置を使わせて頂いた。また金丸龍夫博士には EPMA 分析に関して多大なるご助力を頂いた。ここ

に記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ-, 1999.
- [2] Anma, R., Kawano, Y. and Yuhara, M.: Compositional zoning and its implication in a toroidal circulation inside the Yakushima Pluton, SW Japan, Vol. 53, pp.157-176, 1998.
- [3] 安間了, 坂本仁, Ferre, E. C., Abdeldayem, A. : 屋久島花崗岩の正長石巨晶方向配列と帯磁率異方性ファブリック, 屋久島の成り立ちと生態系, pp. 137-161, 2003.
- [4] 長田昌彦, 高橋学, 松下智昭: 割れ目の幾何学的構造と水みちに関する一考察; 屋久島花崗岩の露頭を例として, 第 12 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 959-964, 2008.
- [5] 松下智昭, 長田昌彦, 竹村貴人, 高橋学: 花崗岩における水みち近傍の硬化原因に関する化学的検討, 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 272-276, 2009.
- [6] 長田昌彦, 松下智昭, 高橋学: 離水サンゴ近傍における割れ目充填物の AMS 年代測定, 平成 21 年度土木学会年次講演会論文概要集, 2009, (発表予定).
- [7] 新井崇史, 塚原弘昭, 森清寿朗: カルサイトの炭素・酸素同位体比から見た野島断層浅部破碎帯のシール過程の解明 (特集「断層帯の物質科学と地震の発生過程」), 地学雑誌, Vol. 112, No. 6, pp. 915-925, 2003.
- [8] Iwatsuki, T., Furue, R., Mie, H., Ioka, S. and Mizuno, T.: Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU), Vol. 20, pp. 2283 - 2302, 2005.
- [9] 阿島秀司, 戸高法文, 岩月輝希, 古江良治: 多変量解析による瑞浪超深地層研究所周辺の地下水化学モデルの構築, 応用地質, Vol. 47, No. 3, pp. 120-130, 2006.
- [10] 寺本雅子, 嶋田純, 國丸貴紀: コア間隙水中の安定同位体比をもとにした低透水性堆積岩盤における地下水挙動の兆候, 応用地質, Vol. 47, No. 2, pp. 68-76, 2006.