

氏名	松下 智昭
博士の専攻分野の名称	博士 (学術)
学位記号番号	博理工甲第 911 号
学位授与年月日	平成 25 年 3 月 22 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	屋久島沿岸域に分布する岩盤割れ目内物質の充填環境及び形成年代
論文審査委員	委員長 准教授 長田 昌彦 委員 教授 渡邊 邦夫 委員 准教授 山辺 正 委員 准教授 小口 千明 委員 准教授 川本 健

論文の内容の要旨

岩盤中の割れ目充填物質は、流入粘土や断層粘土の未固結なものから、低温性・熱水性の充填物質の固結したものまで様々ある。特に、後者の割れ目充填物質については、これまで多数の研究報告があり、その組成、産状、各種同位体比、流体包有物などが調査されている。また、これらの充填物質の年代測定を行った研究も多数報告されており、その多くは数万年からそれ以上に古い値である。

本研究では、屋久島沿岸域の岩石露頭で観察される割れ目充填物質を対象に、その充填環境及び形成年代を明らかにすることを目的として、岩石学的・地化学的な調査・分析と放射性炭素年代測定を実施した。これらの割れ目充填物質は、数千年以内に沈殿・固結したものであり、これまで報告されている割れ目充填物質よりもはるかに若いものである。

現地調査では、対象割れ目及びその充填物質の分布とその巨視的な特徴について調査を行った。主な調査地域は、屋久島の花崗岩露頭であるいなか浜、堆積岩露頭である尾之間海岸、栗生海岸、春田浜である。対象割れ目は、離水サンゴが分布するような潮間帯から潮上帯（現海水面から 3m 以内）に位置し、また様々な走向・傾斜の割れ目で観察された。割れ目内は肌色の物質で充填されており、塩酸で発泡することから炭酸塩であることが現地で確認された。また割れ目沿いに、周辺の母岩よりも数 cm ~ 20cm 程度盛り上がった領域が発達している。現地でのシュミットハンマー及びエコーチップによる硬さ試験から、これらの硬化領域の硬さ（R 値及び L 値）は母岩の 1.2 ~ 1.3 倍の値を示し、力学的に硬化していることが定量的に示された。

次に、現地から採取した試料を用いて、顕微鏡観察、XRD 分析、元素分析を実施し、充填物質の組成や充填（堆積）構造について調査を行った。多くの割れ目充填物質は、セメント物質と様々な種類の碎屑物で構成されている。セメント物質は、主に Mg カルサイトであり、いくつかの試料からは同時にアラゴナイトも検出された。Mg カルサイトは、クロスニコルで暗灰色を呈し、SEM 観察から数 ~ 20 μ m 程度の微小な結

晶であることが明らかとなった。碎屑物は、主に周辺の母岩に由来する岩石片であり、その他にサンゴ片、有孔虫、貝類などの海洋性の生物遺骸が多数含まれている。また、これらの碎屑物によっていくつか特徴的な堆積構造が観察された。具体的には、割れ目やクラック内において相対的に粒径の大きな碎屑物の侵入、碎屑物の配列、層状分布である。

さらに、充填物質の年代値を測定するために、放射性炭素年代測定を実施した。まず、いなか浜の潮間帯から採取した離水サンゴの AMS¹⁴C 年代は、5,320 ~ 5,600 年前であった。充填物質については、各露頭から試料を採取しており、7本の割れ目から計 23 個の試料に対して年代測定を実施した。その結果、すべての充填物質の AMS¹⁴C 年代は 1,900 ~ 5,130 年前であり、離水サンゴの年代値よりも若い値を示した。特に、単一の割れ目内であっても 2,000 ~ 3,000 年の年代幅があることが明らかとなった。また本研究では、炭素安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$) の測定も同時に行なっており、充填物質の $\delta^{13}\text{C}$ は -2.61 ~ 5.73‰ であった。

ここまで得られた結果を総合的に評価し、割れ目充填物質の充填環境及び形成年代に関する考察を行った。充填環境については、花崗岩と堆積岩中から採取した充填物質の特徴の比較、充填物質の起源、炭酸カルシウムの過飽和条件について検討した。まず、花崗岩と堆積岩中の割れ目充填物質を比較すると、分布位置、組成、年代値の点でほぼ一致する。従って、対象とする充填物質は、岩種に関わりなく分布していることが明らかとなった。次に、充填物質の起源を推定するために、XRD 分析結果を用いて Mg カルサイト内の MgCO₃ 含有量を算出したところ、9.9 ~ 15.0 mol% であった。この値は、一般的な海洋性炭酸塩の MgCO₃ 含有量である。さらに、充填物質の $\delta^{13}\text{C}$ について、沈殿時の同位体分別の影響を考慮すると、表層海水の溶存無機炭素の値とほぼ一致することが分かった。以上のことから、充填物質の起源は主に海水であることが明らかとなった。ただし、いくつかの試料は海水の $\delta^{13}\text{C}$ よりも小さな値を示しており、淡水が混合している可能性も考えられた。炭酸カルシウムの過飽和条件については、炭酸カルシウムの飽和指数であるランゲリア指数を用いて考察したところ、最も大きな要因は水の蒸発作用で、その他に CO₂ 脱ガスの影響と淡水の混合の影響が考えられた。

充填物質の年代値については、南西諸島周辺の後期完新世の相対的な海水準変動と密接に関係していることが明らかとなった。さらに年代値変動の要因について検討したところ、海水面からの割れ目の高さの影響は明瞭でなく、充填物質に含まれる生物遺骸の影響は比較的小さいことが分かった。また、充填物質内には層状構造が見られることから、割れ目内で複数回の沈殿過程があったと推定された。従って、このような層状構造が年代値に影響を与えていると考えられた。

論文の審査結果の要旨

本論文の審査委員会は、2013年2月8日に論文発表会を開催した。またこれに先立ち、各審査委員に論文内容を説明し、詳細な質疑を行っている。発表会では、論文内容の主要部分の発表に続いて詳細な質疑および関連した専門的な知識に関する質問も行われた。その発表内容を含む本学位論文審査結果についての概要は以下のとおりである。

本論文は、屋久島沿岸域の岩石露頭で観察される炭酸塩で充填された割れ目を対象に、その充填環境及び形成年代を明らかにすることを目的としたナチュラルアナログ研究を行ったものである。ナチュラルアナログ研究とは、対象とする人工的な挙動を理解する際に、それと類似した挙動を天然現象の中に求め、自然に学ぶ研究のことである。

近年、放射性廃棄物の地層処分や二酸化炭素の地中貯留（CCS）などの大型プロジェクトにおいては、これまでの建設事業とはオーダーの異なる数百年から数万年といった長期的な現象の評価が必要となっている。特に、地下空洞周辺の地下水流れを制御するために施工されるグラウトの長期挙動や、CCSにおける鉱物固定化などの炭酸塩を中心とした物質移動・化学反応・硬化過程などの現象の評価が必要である。多くの場合、このような長期的な現象を評価するために、室内実験や数値解析的な検討を通して未来を推定している。しかしながら、その結果の妥当性を検証できるデータが少ないのが現状である。またこれらのプロジェクトが対象とするような地下深部における物質移動・化学反応・硬化過程は、多孔質媒体よりも、岩盤割れ目を介したものとなっている場合が多い。したがって、岩盤割れ目内における炭酸塩を中心とした物質移動・化学反応・硬化過程について考察しうるナチュラルアナログ物質を探しておく必要がある。

本論文では、このようなナチュラルアナログ物質の一つとして、屋久島沿岸域の岩石露頭に観察される炭酸塩で硬化した割れ目充填物質を取り上げ、そのような割れ目の空間的な分布、充填物質の組成や構造の記載などを通して充填物質の形成環境を議論するとともに、放射性炭素年代を用いて、形成年代を推定している。

第1章では、研究の背景と目的、および本論文の構成が述べられている。

第2章では、炭酸塩に関する既往の研究のレビューとして、海洋性炭酸塩を対象として、炭酸カルシウムの沈殿特性についてまとめている。特にその実例として、これまでに国内外で多数報告されているビーチロックに関する研究をレビューし、分布、巨視的な特徴、組成、形成年代、形成メカニズムについてまとめている。

第3章では、調査地域である屋久島の地質、地形、気候についてまとめている。また屋久島を含む南西諸島の沿岸域には、後期完新世の離水サンゴが多数分布しており、これらは過去の相対的な海水準と密接に関係していることから、南西諸島周辺における過去の相対的な海水準変動についてもまとめている。

第4章では、屋久島沿岸域の岩石露頭調査に基づき、対象とする割れ目及び割れ目充填物質の分布とその巨視的な特徴について記述している。特に、対象とした割れ目充填物が、花崗岩や堆積岩などの母岩によらず、また割れ目の姿勢とは無関係に形成されていることを明らかにしている。また割れ目及びその周辺部における硬化の程度を定量的に示している。

第5章では、現地から採取した試料の岩石学的・地化学的特徴を明らかにするために、顕微鏡観察と化学分析を実施した結果を記述している。薄片観察からは、充填粒子の種類と大きさ、またそれらの充填構造などの特徴を明らかにしている。SEM 観察及び XRD 分析より、非晶質または微晶質の充填物質は Mg - カルサイトを主体としていること明らかにしている。

第6章では、充填物質の放射性炭素年代測定結果をまとめている。比較として測定した離水サンゴの離水年代が 5320 ~ 5600 年前 (yrBP) であるのに対して、充填物質の年代値は必ずその値よりも若い値であることが明らかとなった。このことは、充填物質の硬化が離水後に生じたことを示している。また年代値のバラッキに対する検討も実施している。

第7章では、調査・分析で得られた結果を総合的に解釈し、充填物質の充填環境及び形成年代について考察を行っている。花崗岩及び堆積岩中の割れ目充填物は充填年代もほぼ同じであること、充填物質内の細粒物質は生物遺骸のほか近隣の母岩の碎屑物が多いこと、充填物質は海水のみならず雨水の影響を受けていること、単一割れ目内においても充填年代は 2000 年程度の幅を持っていること、などを明らかにしている。

第8章では、本研究で得られた結論を総括し、さらに今後の展望及び課題についてまとめている。

以上のように、本研究は、屋久島沿岸域の岩石露頭で観察される炭酸塩で充填された割れ目が、数千年オーダーのナチュラルアナログ物質の一つとして過去の様々な情報を記録していることを明らかにしており、今後さらなるデータ収集により長期的な現象評価に有用な実証データを提供しうると考えられる。このことから、当学位論文審査委員会は、本論文が博士（学術）の学位に相応しい内容であると判断した。