

花崗岩中に形成されたサンゴ脈の年代値と物質移行過程

松下智昭^{1*}・長田昌彦²・高橋学³

¹ 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

² 埼玉大学 地圏科学研究センター (〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

³(独) 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 (〒 305-8567 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第 7)

*E-mail: s09de008@mail.saitama-u.ac.jp

沿岸域や海域の地下水は長期的にみて塩水域と淡水域の分布が変化する事が考えられている。そこで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な検討を行うため、屋久島で観察された離水サンゴ周辺の割れ目に対してこれまで多面的に調査を行ってきた。本稿では離水サンゴから延びる割れ目内の充填物質に対して年代測定を行い、その結果をもとに物質移行解析を行った。年代測定の結果、割れ目内の物質はサンゴから離れるほど若い値を示した。次に測定された年代値に対して一次元移流分散方程式を用いた計算を行い、対象割れ目内の物質移動が数十年から数百年程度の間を生じた可能性が高い事を示した。このような割れ目を一つ一つ丹念に調べる事により、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を提供できる可能性がある。

Key Words : granite, coral, radioactive dating, mass transport

1. はじめに

隆起や沈降といった長期的な地形変化や海水準変動は、対象場周辺の境界条件の変化をもたらす、地下水の流動と水質に影響を与えることが考えられている。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が想定される。このような現象を理解する事は、放射性廃棄物の地層処分などの安全性を保障する上でも重要なことである。

本研究では、塩水から淡水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な検討を行うため、屋久島で観察された離水サンゴ周辺の割れ目を対象とし、調査を行ってきた。これまでの研究結果^{1),2),3)}から、降水によってサンゴが溶解し割れ目内へ侵入した可能性が高いため、前述した水質変化による石灰質材料の溶解と岩盤割れ目内への物質移動についてのナチュラルアナログとなる可能性がある。本稿ではサンゴから割れ目内への物質移動の空間的または時間的な変化を調べるために、離水サンゴから岩石中に延びるサンゴの脈に沿ってサンプリングして年代測定を行い、その結果をもとに単純な場を想定して物質移行解析を行った。

2. 対象試料

調査対象としたのは屋久島の北西に位置するいなが浜周辺である。この辺りは花崗岩が露出しており、割れ

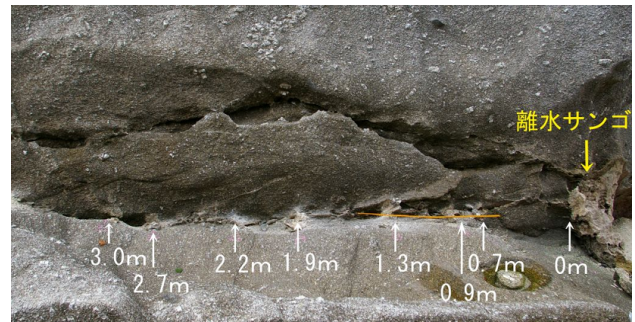


図- 1 離水サンゴから延びる花崗岩中の割れ目。サンプリングした位置をサンゴからの距離で表す。

目近傍が数 cm 程度の幅を持って硬化し、周りの母岩よりも凸な構造となっている割れ目が多数観察される¹⁾。また図-1 で示されるような、離水サンゴから延びている割れ目も観察される。このような割れ目は、周辺にサンゴが観察されなくとも、肌色の物質が割れ目内を充填しており、顕微鏡観察と EPMA 分析結果から、充填物質の大部分は非晶質な炭酸カルシウムであると考えられる²⁾。ただし相対的に幅の狭いクラックには結晶化している鉱物も観察される。年代測定の結果、このような充填物質の年代値はすべてサンゴのものよりも若い値を示した³⁾。さらに割れ目内にはサンゴの破片など周りの花崗岩に由来しないようなものも確認できるため、海水中でサンゴとともに割れ目内に物質が充填したのではなく、サンゴが離水した後、天水などにより溶解し

た⁴⁾物質が割れ目内へ供給された可能性が高いと考えられる。

3. 年代測定と物質移行解析

(1) 放射性炭素年代測定

離水サンゴと割れ目内物質は炭酸塩であることから、放射性炭素を利用した年代測定を行った。

放射性炭素年代測定は AMS(Accelerator Mass Spectrometry=加速器質量分析計)法で行った。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) を用いており、¹³C/¹²C の測定も同時に行っている。

年代値の算出には Libby の半減期 (5568 年) を使用し、以下の式を用いた⁵⁾。

$$T = -8033 \cdot \ln(\text{pMC}) \quad (1)$$

ここに pMC(percent Modern Carbon) は標準試料の ¹⁴C 濃度 (¹⁴C/¹³C あるいは ¹⁴C/¹²C) に対する測定試料の ¹⁴C 濃度の割合である。なお本稿では $\delta^{13}\text{C}$ 補正と暦年較正を行った年代値によって結果を示している。暦年較正には試料が海水起源であることを考慮して、Marine04 Marine curve を用い、OxCalv4.0 較正プログラムを使用している。ただし算出された年代値に関しては、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。

測定した試料は図-1 に示されているように、離水サンゴから延びる割れ目沿いに、0 m(離水サンゴ)、0.7 m、0.9 m、1.3 m、1.9 m、2.2 m、2.7 m、3.0 m の位置でそれぞれ採取したものである。

(2) 移流分散解析

a) 対象場と物質移行過程の仮定

本稿では以下のように仮定し、計算を行った。

- サンゴが離水した後、割れ目内への物質移動が始まる。
- 物質は割れ目内へ一定濃度で供給され、割れ目内では流速と濃度勾配により物質が移動する。
- 割れ目内での流速、拡散係数は変わらないとする。
- 物質の移動距離は、現地で観察された範囲 (3 m) とする。
- 割れ目は半無限に続いている。

以上より、一次元の移流分散方程式を適用した。

b) 移流分散方程式の解析解

移流分散の支配方程式は次のように示される⁶⁾。

$$R \frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2)$$

ここに、 c : 濃度、 u : 流速、 D_L : 移流分散係数である。本稿では物質の吸着などによる遅延は考慮せず、そのため遅延係数は $R=1$ とした。

また前項の仮定を定式化すると以下の初期条件・境界条件を得る。

$$\text{初期条件} : c(x, 0) = 0 \quad (3)$$

$$\text{境界条件} : c(0, t) = c_0 \quad (4)$$

$$: c(\infty, t) = 0 \quad (5)$$

ここに c_0 は割れ目内へ供給される物質の濃度で一定値である。以上の条件で式 (2) を解くと、

$$\frac{c(x, t)}{c_0} = \frac{1}{2} \left\{ \text{erfc} \left[\frac{x - ut}{2\sqrt{D_L t}} \right] + \exp \left[\frac{ux}{D_L} \right] \cdot \text{erfc} \left[\frac{x + ut}{2\sqrt{D_L t}} \right] \right\} \quad (6)$$

となる。ここに $\text{erfc}(z)$ は誤差補関数で、

$$\text{erfc}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty \exp(-y^2) dy \quad (7)$$

である。

ここで pMC を用いると、

$$\text{pMC} = 1 - c \quad (8)$$

である。

4. 結果と考察

(1) 年代測定

測定した試料の $\delta^{13}\text{C}$ とサンゴからの距離の関係を図-2 に示す。今回測定した試料の $\delta^{13}\text{C}$ は 2.76 ~ 5.73 ‰ であり、海洋性の貝殻などと同様に小さな値となっている。これは以前測定した、いなか浜周辺の割れ目内物質と離水サンゴの年代値とほぼ一致する³⁾。また、サンゴからの距離と $\delta^{13}\text{C}$ に相関関係は見られないが、割れ目内物質の $\delta^{13}\text{C}$ はすべて離水サンゴのそれよりも大きな値を示す。本来、安定同位対比は時間によらず同じ物質であればその物質固有の値となる⁵⁾。このような安定同位対比に関する研究報告は数多く存在し、例えば Yasuhara and Kazahaya⁷⁾ は地下水の涵養地点からの空間的な $\delta^{13}\text{C}$ 変化を調べ、地下水の流動過程について述べており、Iwatsuki *et al.*⁸⁾ は花崗岩体中に形成されたカルサイトと地下水の $\delta^{13}\text{C}$ を調べその関係性につい

て議論している。また小元⁹⁾はビーチロックの接着物質である炭酸カルシウムの $\delta^{13}\text{C}$ を調べ、海水の炭酸塩や有機物の $\delta^{13}\text{C}$ とされる $0 \pm 2\text{‰}$ を超えるものが半数近く存在することから、ビーチロック形成には海水だけでなく地下水や天水の寄与もあったとしている。このように安定同位対比は地下水などの流動過程や物質の起源を推定する上で重要なものであり、本研究で対象としている割れ目内物質と離水サンゴの安定同位対比の差が、形成過程あるいは起源が異なることを示唆している可能性がある。

次に測定した試料の暦年較正年代を計算結果と一緒に図-3に示す。まず年代測定結果から、離水サンゴの形成年代は $5600 \pm 40\text{yrBP}$ であり、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³⁾。また割れ目内物質は離水サンゴから離れるほど若くなる傾向を示す。このような年代差は形成年代の違い、または算出される年代値が ^{14}C 濃度に依存するため、炭素の同位体分別の影響によるものと考えられる。現地調査において対象割れ目沿いに存在する硬化した領域はほぼ同じ幅であり、これは割れ目から母岩方向への物質の拡散範囲がほぼ等しいことを示すものであると考えられる。仮に割れ目内の物質がサンゴ近くから硬化したとすれば、硬化した領域はサンゴの近くほど大きくなるはずである。よって割れ目内物質は離水サンゴ近くから徐々に硬化していったのではなく、全体がある同じ時期に硬化したのと考えられる。そこで本稿では年代差が同位体分別の影響、すなわち割れ目内を移動する過程で ^{14}C が選択的に割れ目内へ沈殿していったことによるものと考え、計算を行った。

(2) 移流分散解析解を用いた計算結果

計算に用いたパラメータは文献¹⁰⁾を参考に表-1のように仮定し、初期濃度 c_0 は年代測定結果より仮定した。なお c_0 はサンゴのpMCではなく、サンゴに一番近い割れ目内物質のpMCを用いた。その理由は、サンゴから溶出した物質は天水などと混ざり合い、そこで再び炭素交換が行われた可能性があるためである。よって本研究で採取した試料の中で、サンゴに最も近い割れ目内物質である0.7mの試料のpMC(=56.29%)を初期濃度と仮定した。また物質移動に要した時間を $t=1000$ 年、100年、10年、1年と仮定し計算を行った。流速は最小二乗法を用いて年代測定結果と最もフィッティングするときの値とした。移流分散係数 D_L は流速 u 、縦方向分散長 α 、実効拡散係数 D を用いて算出した。

$$D_L = u\alpha + D \quad (9)$$

計算結果として各時間に対する割れ目内の流速と分散係数を表-2に示す。なお図-3に示した結果は $t=100$ 年の場合である。ここで例えば文献¹⁰⁾における断層内

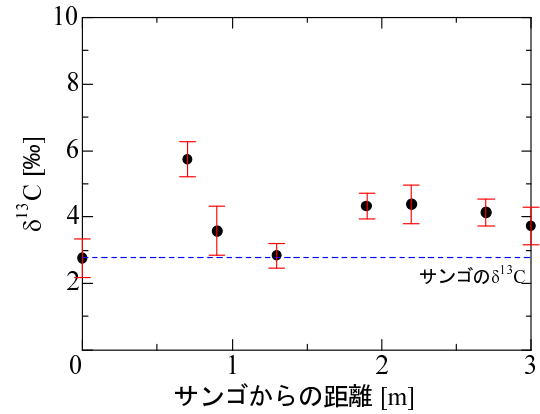


図-2 対象割れ目沿いの $\delta^{13}\text{C}$ 値

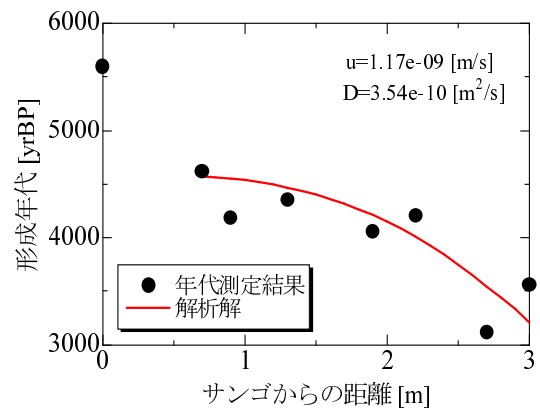


図-3 対象割れ目沿いの年代値 ($t=100$ 年)

表-1 計算に用いたパラメータ

移動距離 [m]	3
実効拡散係数 [m^2/s]	3×10^{-12}
縦方向分散長 [m]	0.3

表-2 計算結果

時間 t [年]	流速 u [m/s]	分散係数 D_L [m^2/s]
1000	1.18×10^{-10}	3.84×10^{-11}
100	1.17×10^{-9}	3.84×10^{-10}
10	1.17×10^{-8}	3.84×10^{-9}
1	1.17×10^{-7}	3.84×10^{-8}

の核種移行解析では流速を 10^{-6} [m/s] オーダーと仮定しており、対象としている場合は異なるが、仮に本研究で対象としている割れ目内にもそれと同程度の流速があったとした場合、物質移動に要した時間は1年以内であったことが推定される。

現時点では対象場周辺の境界条件がはっきりしていないので明確な解は示せないが、表-2に示されるよう

に、対象場の物質移動に要した時間は数十年から数百年程度である可能性が高いと考えられる。

今後更なる調査を重ね、より詳細な解析をしていきたいと考えている。

5. まとめ

離水サンゴから延びる割れ目沿いに年代測定を行い、その結果をもとに一次元定常状態の移流分散解析解を用いた簡単な計算を行った。本稿では前述したように対象場と物質移動過程を仮定したが、まだまだ不明な点も多く、今後は特に対象場周辺の環境条件（水質など）や境界条件（流速や時間、物質の充填過程など）を明らかにしていきたいと考えている。そのために割れ目内物質の薄片観察や SEM 観察による鉱物学的な検討を行い、さらにマイクロフォーカス X 線 CT を用いて 3 次元的に割れ目内物質の充填の様子を調べていく予定である。このように対象割れ目を詳細にかつ多面的に検討する事により、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を提供できると考えている。これにより例えば地下岩盤中のコンクリート構造物やグラウトと地下水との相互作用や CO₂ の地中貯留など応用できる可能性がある。

参考文献

- (1) 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. 岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 959–964, 2008.
- (2) 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. 岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 272–276, 2009.
- (3) 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. 土木学会年次学術講演会, 2009.
- (4) 松井信行, 道脇綾子. 環境の立場から見た炭酸カルシウム. 東京外国語大学留学生日本語教育センター論集, Vol. 33, pp. 85–96, 2007.
- (5) M. Stuiver and H. A. Polach. Discussion: Reporting of ¹⁴C data. *Radiocarbon*, Vol. 19, pp. 355–363, 1977.
- (6) K. Sato and Y. Iwasa. *Groundwater Hydraulics*. Springer, pp.89-91 2005.
- (7) M. Yasuhara and K. Kazahaya. A stable carbon isotope study on direct precipitation recharge to the aquifer in the city of Yamagata, northern Japan. In *Impact of urban growth on surface water and groundwater quality*, No. 259, pp. 151–160, 1999.
- (8) T. Iwatsuki, S. Xu, S. Itoh, M. Abe, and M. Watanabe. Estimation of relative groundwater age in the granite at the Tono research site, central Japan. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, Vol. 172, pp. 524–529, 2000.
- (9) 小元久仁夫. 沖縄島, 古宇利島, 屋我地島および浜北嘉島から採取したビーチロック試料の較正年代と安定同位体比 ($\delta^{13}\text{C}$). 日本大学文理学部自然科学研究所研究紀要, No. 44, pp. 1–17, 2009.
- (10) 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 次とりまとめ-. 核燃料サイクル開発機構, 1999.

AGE AND MASS TRANSPORT OF THE CORALINE VEIN IN YAKUSHIMA GRANITE

Tomoaki MATSUSHITA, Masahiko OSADA
and Manabu TAKAHASHI

Coraline vein in Yakushima granite was investigated to evaluate the mass transport in rock fracture. This vein has connected to the emerged coral and is filled with amorphous material and some fragments. In this study, the radioactive dating was performed to reveal the age of the coraline vein and results showed that the age of coraline veins become older when it is closer to emerged coral. Further analysis was performed using numerical analysis based on advection-diffusion model. It revealed that these veins were formed during several ten or several hundred years.