

共同利用実施報告書(研究実績報告書)
(一般共同研究)

1. 課題番号 2 0 1 4 - G - 2 5

2. 研究課題名 (和文、英文の両方をご記入ください)

和文: 大理石岩体を破壊させた地殻流体の起源の解明

英文: Origin of geofluid to produce brecciated marble

3. 研究代表者所属・氏名 広島大学大学院理学研究科・安東淳一

(地震研究所担当教員名) 中井俊一教授

4. 参加者の詳細 (研究代表者を含む。必要に応じ行を追加すること)

氏名	所属・職名	参加内容
安東淳一	広島大学大学院理学研究科	試料採取及び微細組織観察
中井俊一	東京大学地震研究所	同位体化学組成分析
石山沙耶	広島大学大学院理学研究科	同位体化学組成分析

5. 研究計画の概要 (申請書に記載した「研究計画」を 800 字以内でご記入ください。変更がある場合、変更内容が分かるように記載してください。)

地殻流体は、内陸地震の発生に大きな影響を与えていると考えられる。この両者の関係を明らかにするために近年では、1) 地震波トモグラフィー法を用いた地殻内部観測、2) 地球化学的な手法を用いた地表に流出する水の起源の解明、3) 岩石変形実験による地殻構成岩石の含水条件下での物性の解明などの研究が進められている。これらの研究とともに、より多角的な見地から地殻流体と内陸地震の関係を明らかにするには、実際に地殻流体によって破壊された岩石の研究が不可欠である。申請者らは、福岡県北東部に位置する平尾台に露出する平尾石灰岩層に認められる角礫岩層を、この様な地層であると判断し、破壊の過程とともに、岩石中に残存する流体包有物の起源の解明を進めている。

研究対象としている平尾石灰岩層は、近接して存在する平尾花崗閃緑岩による接触変成作用によって生成された難透水性の結晶質石灰岩から構成されており、破碎の程度により以下の A~D の 4 タイプに区分できる。A タイプ: 非破碎結晶質石灰岩。B タイプ: 破断面の形成が確認できる結晶質石灰岩。C タイプ: 破碎が進行し角礫化が認められる結晶質石灰岩。D タイプ: 角礫化がかなり進行し、一部の礫は円礫化している結晶質石灰岩。この C タイプと D タイプを示す結晶質石灰岩中に、多量の流体包有物が存在する。我々は、この流体包有物は、結晶質石灰岩の破碎を引き起こした流体の残存物と考えている。本研究では、この流体の起源を明らかにする目的で、結晶質石灰岩の変形微細組織観察と、その構成鉱物である方解石の化学組成分析、また流体包有物のラマン分光分析や均質化温度及び融点の測定を行っている。そして、東京大学地震研究所においては、中井俊一教授の指導のもとで、方解石と流体包有物の REE 分析、及び Rb-Sr 同位体比分析を行った。

6. 研究成果の概要（図を含めて1頁で記入してください。）

キーワード（3～5程度）：大理石、水圧破碎、Sr 同位体、希土類元素

REE 分析と Rb-Sr 同位体比分析の結果：

A タイプを示す結晶質石灰岩を構成する方解石と、C タイプを示す結晶質石灰岩の基質部を構成する細粒な方解石の REE 存在度パターンは、Ce と Eu を除けば非常に酷似している（図 1）。また、REE 濃度は基質部に存在する細粒な方解石のほうが約 2 倍高いことが分かる。これらの結果は、1) 結晶質石灰岩の破壊に関与した流体は、破壊を起こす前に平尾石灰岩層を構成する結晶質石灰岩と十分に反応した状態であったこと、2) 基質部を構成する細粒な方解石は流体から結晶化した、或いは、破碎によって細粒化した方解石に、流体から REE が拡散した可能性が強いことを示唆している。

Rb-Sr 同位体の測定結果から、流体包有物の Sr 同位体比は、0.7079～0.7098 の値を示すことが分かる（図 2）。またこれらのデータは、近接して存在する平尾花崗閃緑岩を構成する黒雲母、斜長石、及び全岩が形成するアイソクロン上にプロットできない。これらの結果は、1) 結晶質石灰岩は複数回の流体による破壊を経験した可能性と、2) この流体は、平尾花崗閃緑岩の起源となるマグマ由来の流体とは直接的な関係を持たないことを示唆している。

その他の結果：

EPMA による主要元素分析から、A タイプを示す結晶質石灰岩を構成する方解石（0.4～0.8 wt% の MgO を含有する）とは異なり、C タイプと D タイプを示す結晶質石灰岩は、ほぼ純粋な化学組成を有する方解石から構成されていることが明らかとなった。これは Ca 組成に富んだ流体と非変形の方解石との接触による Ca と Mg の相互拡散で説明可能である。また、流体包有物の均質化温度は 65℃～280℃と幅広い値を示し、融点から推定される含有塩濃度はほぼ 0 % である。更にラマン分光分析から、包有流体が H₂O であることが明らかとなった。これらの測定結果は、H₂O を主体とする含有塩濃度の低い、Ca 組成に富んだ流体が結晶質石灰岩の破壊に関与したことを示唆している。塩濃度がほぼ 0 % であることは、スラブ脱水流体である可能性が低いことを示唆している。

本研究で得られたデータから考察できる平尾石灰岩層を構成する結晶質石灰岩を破碎させた流体は、天水を起源とし、かつ平尾石灰岩層を構成する結晶質石灰岩と十分に反応した状態、すなわち平尾石灰岩層と接した状態が長く継続した H₂O であった可能性が強い。この様な特徴を有する流体が複数回関与して、平尾石灰岩層に認められる角礫岩層を形成させたと考えられる。

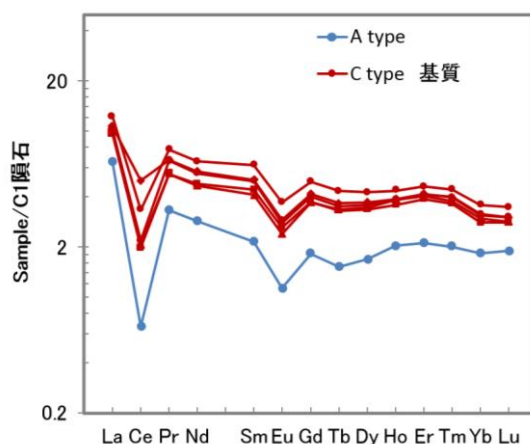


図 1：REE 測定結果

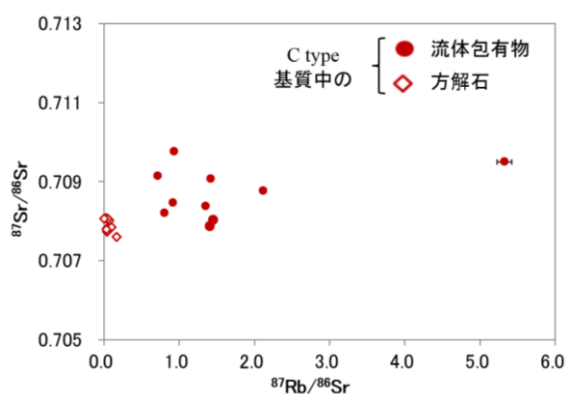


図 2：Rb-Sr 同位体測定結果

7. 研究実績（論文タイトル、雑誌・学会・セミナー等の名称、謝辞への記載の有無）

学会発表：

- ・地質学的証拠に基づいた地殻流体が関与する岩石破壊過程の解明
石山沙耶、安東淳一、中井俊一、太田泰弘、Kaushik Das、日本地球惑星科学連合 2014 年大会
http://www2.jpгу. org/meeting/2014/PDF2014/S-CG62_all. pdf
- ・地殻流体によって引き起こされた岩石破碎現象の解明
石山沙耶、安東淳一、Kaushik Das、太田泰弘、中井俊一、日本地質学会第 121 年学術大会
https://www.jstage.jst.go.jp/article/geosocabst/2014/0/2014_233/_pdf
- ・地殻流体が関与する岩石破碎過程の解明
石山沙耶、安東淳一、Kaushik Das、中井俊、太田泰弘一、日本鉱物科学会学会 2014 年大会

地質学的証拠に基づいた地殻流体が関与する岩石破壊過程の解明 Generation process of brecciated marble at Hiraodai karst, Kyushu, Japan

石山 沙耶^{1*}; 安東 淳一¹; 中井 俊一²; 太田 泰弘³; ダス カウシク¹

ISHIYAMA, Saya^{1*}; ANDO, Jun-ichi¹; NAKAI, Shun'ichi²; OTA, Yasuhiro³; DAS, Kaushik¹

¹ 広島大学理学研究科地球惑星システム学専攻, ² 東京大学地震研究所, ³ 北九州市立自然史・歴史博物館いのちのたび博物館

¹Department of Earth and Planetary Systems Science, Hiroshima University, ²Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, ³Kitakyushu Museum of Natural history & Human history

Geofluid is believed to be closely related to the seismic and volcanic activities. However, the detail relationship of geofluids with seismicity and volcanic activity is not studied properly through geological observations. We have found recently the brecciated marble widely distributed at Hiraodai karst plateau, Fukuoka Pref. This brecciated marble offers unique opportunity to study the relationship between geofluid and seismicity. Here, we shall explore the generation process of this brecciated marble through geological, microstructural and geochemical methods using polarization microscope, SEM, TEM, EPMA, microthermometric and MC-ICP-MS techniques.

The marble in Hiraodai karst plateau was thermally metamorphosed due to Cretaceous Hirao granodiorite intrusion. The brecciated marble occupies about 0.7 km x 1km of area in the central part of the karst. The main results of the present study are as follows.

- 1) The brecciated marble is composed of the rock fragments with variety of sizes ranging from millimeter to meter scale, and having angular to rounded shapes.
- 2) Numerous fluid inclusions are observed in the thin section of the brecciated marble.
- 3) TEM observation shows that the dense tangled dislocations are formed in calcite grains of the brecciated marble.
- 4) The homogenization and freezing temperatures of the fluid inclusions are about 240 deg C and 0 deg C, respectively.
- 5) The whole-rock and mineral separates (biotite and plagioclase) of Hirao granodiorite yields Rb-Sr isochron age of 129.4 +/- 2.4 Ma. Interestingly, Rb-Sr data of the fluid inclusions also lie on the Rb-Sr isochron of Hirao granodiorite.

The above-mentioned results of 1) and 2) suggest that the brecciation occurred by fluid infiltration and that the fragments were moved and rotated at very high speed. The result 3) demonstrates that the calcite grains of the brecciated marble experienced high stress. These three results together indicate that the brecciation process might generate seismic wave. On the other hand, the results of 4) and 5) suggest that the possible origin of the fluid inclusion is the released fluid from the Hirao granodiorite magma. Therefore, the brecciation of marble distributed at Hiraodai karst plateau was probably generated by magmatic fluid from Hirao granodiorite under high stress condition at 129.4 +/- 2.4 Ma ago.

Keywords: Brecciated rock, Hiraodai karst, Hirao granodiorite, Fluid inclusion, Rb-Sr isotope

地殻流体によって引き起こされた岩石破碎現象の解明
石山沙耶・安東淳一・Kaushik Das (広島大学理学研究科)・
太田泰弘 (北九州市立自然史・歴史博物館)・中井俊一
(東京大学地震研究所)

Mechanism of rock fracturing triggered by geofluid
Saya Ishiyama, Jun-ichi Ando, Kaushik Das (Hiroshima Univ.),
Yasuhiro Ota (Kitakyushu museum of natural history & human
history) and Shun'ichi Nakai (ERI, The Univ. of Tokyo)

【はじめに】

地殻流体は沈み込み帯で生じている内陸地震に密接に関与していると考えられており、地震波トモグラフィーによる流体分布の可視化や、湧水・井戸水の同位体化学分析による流体の起源推定など様々な手法により研究が進んでいる。しかし現時点では、地殻流体による破壊現象を記録した岩石を用いて破碎の素過程を明らかにした研究は少ない。本研究では、平尾台カルストに露出する特徴的な破碎岩について 1) 地表における分布の調査、2) 方解石の化学組成分析、3) 変形微細組織観察、4) 流体包有物の均質化温度・融点測定 5) Rb-Sr 同位体分析を行い、比較的高温かつ複数回の熱水活動によって形成された可能性が強いことを明らかにした。

調査地域：本研究の対象地域は、福岡県北九州市に位置する平尾台である。平尾台は約 12km² の石灰岩ブロックからなる日本 3 大カルストの 1 つであり、その起源は石炭紀～二畳紀にかけて海洋において堆積したサンゴ礁とされる(中江ら, 1998)。また本地域の石灰岩は白亜紀花崗岩類である平尾花崗閃緑岩による接触変成作用を受け、粗粒な方解石からなる大理石と変成されている。

【研究結果】

破碎岩の特徴と分布：本破碎岩は、角礫または円礫状の岩片とそれを取り込んだ細粒な基質からなる固結した岩石であり、岩片は数 μm 以下から 1m 以上の大きさのものが存在する。また岩片と基質の接触面において、不規則角礫状の破碎により、三次元的なジグソーパズル状組織を呈するものが存在する。破碎岩は平尾台東部において直径約 1km の円形、また NW-SE 方向に約 250m、NE-SW 方向に約 50m の楕円形状の分布を示す。また、岩片と基質を構成する方解石は、周囲の破碎していない大理石を構成する方解石と比べて多量の流体包有物が存在することで特徴づけられる。

流体包有物の均質化温度・融点：加熱冷却台を用いて測定を行った。岩片中の流体包有物の均質化温度は約 145℃と約 215℃、基質中では約 200℃と約 240℃のものが多く、また融点は岩片・基質両者とも約 0℃である。

方解石の化学組成分析：EPMA を用いて分析を行った。大理石中の方解石は 1.0wt% 以下の Mg を含んでいる。その含有率は非破壊の大理石で約 0.4wt%～0.7wt% であるが、破碎岩岩片において約 0.3wt%、基質において約 0.0wt%～0.3wt% と減少する。また基質を構成する方解石は粒界付近で特に Mg 含有率が低く (0.2wt% 以下)、粒界付近では細粒な鉄水酸化物やカオリナイト、アパタイトが濃集している。

変形微細組織観察：TEM を用いて観察を行った。岩片を構成する方解石には転位が多く存在し、かつからみあっているが、基質では岩片ほど多くの転位は見られない。

同位体分析：方解石と含有されている流体包有物の Rb-Sr 同位体比分析によって、約 1 億年前、約 3000 万年前を示す 2 種類のアイソクロンが得られる。

【考察】

本研究結果は、以下の 4 点を強く示唆する。

- ① 本破碎岩には、破碎の初期と考えられる不規則な角礫状の割れから、淘汰された円摩礫まで様々な破碎段階の岩片が存在し、脆性破壊に伴って破碎流動が起きたと考えられる。また、破碎岩の円形・楕円形状の分布と、多量の流体包有物の存在も合わせて考えると、本破碎岩は地殻流体が関与した水圧破碎により形成された可能性が高い。
- ② 破碎岩を構成する方解石は、流体による変質 (Mg 含有率の減少) を受けたと考えられ、その影響は基質の方解石粒界付近で最も強い。さらに鉄水酸化物などの鉱物が粒界に選択的に濃集していることから、流体が方解石粒子の間隙を通過する際に、溶存していたものの沈殿が起きたと考えられる。また、基質に包有されている初生的な流体は破碎を引き起こした流体であると考えられる。
- ③ TEM での変形微細組織観察から、岩片は破碎時に受けた高応力を記録していることが分かった。基質中の転位が岩片よりも少なかったのは、流体から沈殿した方解石を観察した為だと考えられる。
- ④ 比較的高温かつ低塩濃度の流体が、破碎を引き起こした可能性がある。
- ⑤ 2 種類の傾きのアイソクロンが得られることから、破碎は少なくとも 2 回起きた。

引用文献: 中江訓ほか(1998) 小倉地域の地質 福岡(14)第 34 号 NI-52-10-1 地質調査所

地殻流体が関与する岩石破壊過程の解明

石山沙耶*, 安東淳一, Kaushik Das (広島大学), 中井俊一 (東大地震研)
太田泰弘 (北九州市博)

Process of rock fracturing triggered by geofluid

S. Ishiyama*, J. Ando, K. Das (Hiroshima Univ.), S. Nakai (ERI, Tokyo Univ.),
Y. Ota (Kitakyushu Museum)

地殻流体は沈み込み帯で生じている内陸地震に密接に関与していると考えられており様々な手法により研究が進んでいる。例えば地震波トモグラフィによる流体分布の可視化や、湧水・井戸水の同位体化学分析による流体の起源推定などがある。しかし現時点では、地殻流体による破碎現象を記録した岩石を用いて破碎の素過程を明らかにした研究は少ない。本研究では平尾台カルストに露出する特徴的な破碎岩を対象として、1) 地表における分布の調査、2) 方解石の化学組成分析、3) 変形微細組織観察、4) 流体包有物の均質化温度・融点測定 5) Rb-Sr 同位体分析を行い、地殻流体による岩石破壊の素過程の解明を進めている。

調査地域：平尾台カルストは福岡県北九州市に露出する（露出面積は約 12km²）日本 3 大カルストの 1 つである。その起源は石炭紀～二畳紀に堆積したサンゴ礁とされる（中江ら, 1998）。平尾台に分布する石灰岩は白亜紀花崗岩類である平尾花崗閃緑岩による接触変成作用を受け大理石へと変成されている。

【研究結果】

破碎岩の特徴と分布：研究対象の破碎岩は、平尾台カルストの東部の 2 箇所に認められる。その露出は、直径約 1km の円形状と、NW-SE 方向に約 250m、NE-SW 方向に約 50m の楕円形状を有する大きさである。本破碎岩は、数 μm 以下から 1m 以上の大きさの角礫および円礫状の岩片と、それを取り込んだ細粒な基質から構成されている。基質中には、細粒な鉄水酸化物やカオリナイト、アパタイトが濃集している。角礫状の岩片は複雑に入り組んだ粒界を有するものが多く観察できる。重要な特徴は、破碎岩にのみ多量の流体包有物が存在するという点である。

流体包有物の均質化温度・融点：加熱冷却装置を用いて測定を行った。岩片中の流体包有物の均質化温度は約 145℃と約 215℃、基質中では約 200℃と約 240℃にピークを有する。また融点は岩片・基質両者とも約 0℃である。

方解石の化学組成分析：EPMA を用いて分析を行った。破壊を受けていない大理石中の方解石は約 0.4wt%～0.7wt% の Mg を含有している。一方、破碎岩中の岩片における Mg の含有量は約 0.3wt%、基質においては 0.3wt% 以下と減少する。特に、基質を構成する方解石は粒界付近で Mg 含有率がより低い傾向がある。また、細粒な鉄水酸化物やカオリナイト、アパタイトも粒界付近の方解石中に強く濃集している。

変形微細組織観察：TEM を用いて観察を行った。岩片を構成する方解石には、絡み合った多くの転位が存在するが、基質を構成する方解石中には転位がほとんど存在しない。

同位体分析：方解石と含有されている流体包有物の Rb-Sr 同位体比分析を MC-ICP-MS を用いて行った。その結果、約 1 億年前、約 3000 万年前を示す 2 種類のアイソクロンが得られた。

【考察】

本研究結果から考察できる、本破碎岩の形成素過程は以下である。

① 破碎岩の地表での露出が円形-楕円形状であり、多量の流体包有物を含有していることから、本破碎岩は地殻流体が関与した水圧破碎によって形成されたことが強く示唆される。また、円礫化した破碎岩片が存在することから、脆性破壊に伴って破碎流動が生じたと考えられる。② 破碎岩を構成する方解石は、流体による変質（Mg 含有率の減少）を受けたと考えられ、その影響は基質の方解石粒界付近で最も強い。③ TEM での変形微細組織観察から、岩片は破碎時に受けた高応力を記録していることが分かった。基質中の転位が岩片よりも少なかったのは、流体から沈殿した方解石を観察した為だと考えられる。④ 比較的高温かつ低塩濃度の流体が、破碎を引き起した可能性がある。⑤ 流体包有物が示す 2 種類のアイソクロンから、流体が関与した破碎は、時間的な間隔をあけて少なくとも 2 回起きたと考えられる。