

平成 30 年 5 月 24 日現在

機関番号：11301
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2015～2017
 課題番号：15K17783
 研究課題名(和文) 剪断クラックの幾何学，化学組成と水理学的特性：深部流体による岩石破壊過程の解明

 研究課題名(英文) Geometry, chemistry and hydraulic properties of shear cracks: Rock fracturing processes by geofluid infiltration

 研究代表者
 宇野 正起 (Uno, Masaoki)

 東北大学・環境科学研究科・助教

 研究者番号：50748150
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では，地殻深部における岩石-流体破壊現象の天然岩石サンプルから，時間スケール・流体圧分布・透水係数を求める，新たな解析手法を開発した．中部から下部地殻の岩石-流体反応帯を解析し，流体流入の時間スケールが数時間～数日程度と非常に短いこと，亀裂から母岩へ数 kbar/cmの高い流体圧勾配が存在したこと，透水係数(\log_{10} [m²]単位)は亀裂で約 -15と高く，母岩で約 -20～-23と非常に低いことを明らかにした．以上より，地震波で観測される数時間～数ヶ月の流体移動現象と，地質学的に観察される剪断クラックを，具体的な時間スケールと水理学特性により対応づけることが可能となった．

研究成果の概要(英文)：In this study, new methods were developed for constraining the time-scale, fluid-pressure gradients, and permeability of crustal fluid-rock fracture samples. As analogies for island arc and continental arc crusts, fluid-rock reaction zones were investigated for Sanbagawa metamorphic belt and Sor Rondane Mountains of east Antarctica. The results revealed very short fluid infiltration time-scales of several hours to days, high fluid-pressure gradients of ~kbar/cm from the cracks to the host rocks, and very high and low permeabilities for the cracks and the host rocks (~-15 and -20 to -23 in \log_{10} [m²] unit, respectively). These time-scales and hydraulic parameters enables quantitative comparisons between geophysically-observed fluid transport phenomena and geologically-observed shear cracks.

研究分野：岩石 流体反応と沈み込み帯のダイナミクス

キーワード：剪断クラック 地殻流体 流体移動 変成岩 流体流入時間スケール 流体圧勾配 透水係数

1. 研究開始当初の背景

地下深部における岩石の破壊現象は、流体分布と密接な関係が指摘されており、その素過程の理解には物質科学的理解が不可欠である。特に、余震やゆっくり地震、注水試験に伴う誘発地震の伝播速度は流体の移動速度と関連付けられてきた。しかしながら、地球物理学的に観測される流体移動現象と、地質学的に観察されるクラックとの対応関係はよくわかっていないのが現状である。

高压変成岩中のクラックは、地下深部の流体活動の痕跡として広く解析されてきた。特に母岩と反応帯の化学分析から流体総流量の推定、構造地質学的分析から応力方向や差応力解析が行われてきた。しかしながら、水理学的な研究、特にクラック中の**流体移動時間・流体圧・透水係数**に関する研究は、手法の欠如からほぼ皆無であり、高压変成岩中のクラック形成の水理学パラメーターは不明である。

2. 研究の目的

本研究では、(1)露頭・岩石組織観察によるクラックの幾何学解析、(2)反応帯解析による流体流入継続時間の決定、および(3)流体圧解析による透水係数の決定の3つの課題から、地球物理学的な観測と比較可能な水理学パラメーターを決定し、深部岩石—流体破壊過程の水理学的な実態を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) 剪断クラックの幾何学特性の把握

地下深部での岩石—流体破壊現象の空間スケールを把握するため、露頭スケールから薄片スケールまでの幅広い範囲で剪断クラックの分布を計測する。対象は露出の良好な三波川変成帯であり、ドローンを用いた100 mスケールから薄片下の数十 μm スケールまでを解析する。

(2) 流体流入継続時間の制約

岩石—流体破壊現象の活動時間のスケールを制約するために、クラック周囲の反応帯の鉱物・全岩化学組成プロファイルを詳細に解析する。得られた化学組成プロファイルに対して反応—移流—拡散方程式を適用し、流体流入継続時間、母岩中の流体移流速度を制約する。対象は前述の三波川変成帯中の剪断クラックおよび塩水活動の痕跡がよく観察できる東南極セールロンダーネ山地の岩石—流体反応帯を用いる。

(3) 流体圧解析による透水係数の制約

水流体の挙動を支配する、クラックおよび母岩中の透水係数を、流体圧解析から明らかにする。反応帯の熱力学解析から、クラックから母岩にかけての流体圧勾配を制約する新たな解析スキームを確立する。得られた流体圧勾配と(2)で得られた流体の移流速度から母岩・クラックの透水係数を明らかにする。

(4) 反応帯形成フォーワードモデルの開発

反応帯を構成する主要元素の挙動は、鉱物の熱力学特性に支配され非線形であるため、フ

ォワードに予測することが難しい。化学ポテンシャルを駆動力とした新たな反応—拡散系のモデルを構築し、反応帯の鉱物プロファイルを再現するフォーワードモデルを開発する。

(5) 考察 天然反応帯の解析結果やモデリングをもとに、クラック活動時の水理学過程と、その地球物理的観測との関係について考察する。

4. 研究成果

(1) 剪断クラックの幾何学特性の把握

野外調査における詳細な露頭観察により、三波川変成帯中の片理面に平行なクラックの中には、沈み込み時のせん断破壊を記録しているものがあることが明らかになった。その変位方向は、変成帯上昇期に形成された鉱物線構造とほぼ直行する方向であり、変位量は数 mm~1 cm 程度、クラックの長さは数 m~数十 m である (図1)。

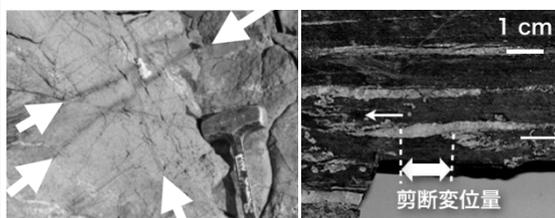


図1. 剪断クラックの産状(左)と変位量(右)

(2) 流体流入継続時間の制約

東南極セールロンダーネ山地から採取された角閃岩中のクラックとその周囲の反応帯には、アパタイト中の塩素濃度に明瞭なプロファイルが観察された (図2)。地質温度圧力計の解析から、このクラックが形成された温度圧力条件は、~600°C、~0.5 GPa であり、中部~下部地殻相当の岩石—流体破壊に相当する。

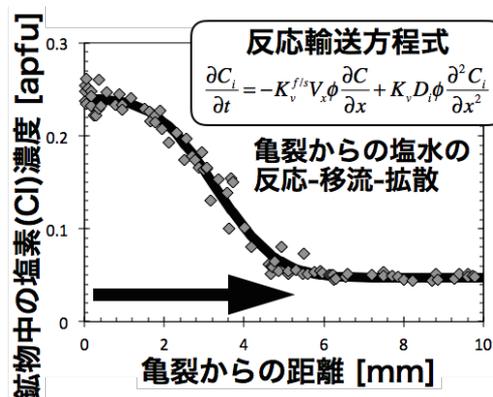


図2. 反応帯の塩素プロファイル

この塩素プロファイルを反応—移流—拡散方程式により解析した結果、流体流入の継続時間が6時間~数日程度、母岩への流体移流速度は~3 cm/s であることが明らかになった (図2)。これは従来放射性元素から求められていた地質学的な時間スケール(~100 万年)と大きく異なり、非常に短い岩石—流体反応が岩石中に保存されていることを明らかにした。

(3) 流体圧解析による透水係数の見積手法の開発

上記のような反応帯から透水係数を求めるために、流体圧分布を推定する新たな手法を開発した。具体的には、反応帯の各部分の全岩組成と含水量を X 線マップ像から求める。各部分に対して Gibbs 自由エネルギー最小化アルゴリズムにより、クラック形成時の温度・圧力条件下での H₂O の活動度を求め、フガシティーから流体圧を見積もることができる。クラックから母岩にかけての流体圧勾配は、上記の角閃岩中のクラックでは ~300 MPa/5 mm、花崗岩質ダイク-グラニュライト反応帯 (0.5 GPa, 700°C) では 100 MPa/10 cm であることが明らかになった (図 3)。

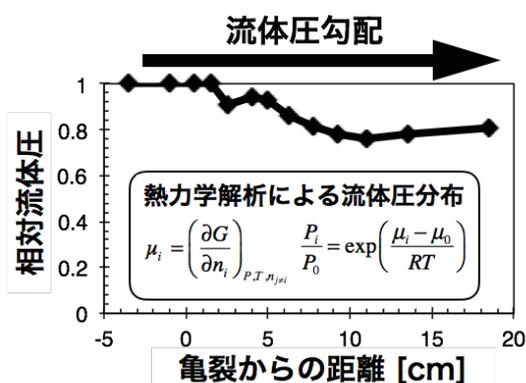


図 3. 復元されたクラック周囲の流体圧勾配

得られた流体圧勾配と (2) で求めた時間スケール、移流速度を用いると、母岩の透水係数は約 $10^{-20} \sim 10^{-23} \text{ m}^2$ と非常に低かったことが明らかになった。また、露頭観察からクラック長さを数十 m、薄片観察からクラック開口幅を数十 μm とすると、クラック内の透水係数は約 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ m}^2$ と見積もられ、母岩と比較してクラックによる水輸送の寄与が非常に大きいことを明らかにした。

(4) 反応帯形成フォーワードモデルの開発

化学ポテンシャル勾配を駆動力として固相の熱力学に基づく、新たな反応-拡散系のフォーワードモデルを構築した。これにより、従来の溶液の熱力学を用いた反応輸送モデルでは難しかった、変成作用条件下の高温・高圧下 (>300°C) で、任意の岩石組成間の反応帯の形成をフォーワードに予測することが出来るようになった。また、変成岩鉱物の複雑な固溶体モデルを導入可能であり、反応帯における固溶体組成 (例えば Mg#) の時空間発展を予測できるようになった (図 4)。モデルを Fo-Fa-Qtz 系、Fo-Qtz-H₂O 系に適用した結果、既存の水熱実験の反応帯の特徴を再現・予測することができた (図 4)。

(5) 考察

現在、地球物理学的に観測される流体移動現象の継続時間は、数十秒~数日、数ヶ月まで幅広い。本研究で見出された数時間~数日の流体活動は、中部地殻条件下であり、時間

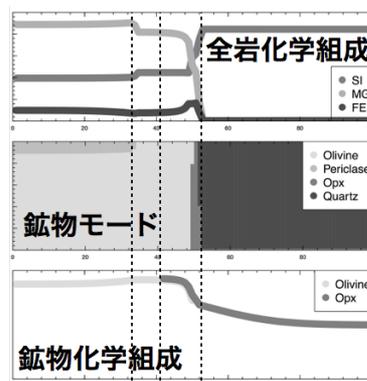


図 4. フォーワード反応帯予測モデル計算例

スケールとしては内陸群発地震の震源の伝搬と対応することが出来る。また、母岩の透水係数の $10^{-20} \sim 10^{-23} \text{ m}^2$ は、大陸地殻の透水係数モデルより有意に低い。一方、クラック内の透水係数の $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{ m}^2$ は、内陸地震の震源の拡散から予測される透水係数 10^{-15} m^2 とほぼ一致する。また、(1)で観察された断層のモーメントマグニチュードは 0~1 程度であり、高精度の地震波観測網で観測される微小地震に対応する。このように、本研究で開発された手法により、地球物理学的に観測される現象と、地質学的に観察されるクラックが、具体的な時間スケール、水理学パラメータを通して比較可能になってきた。今後、本研究で開発された手法を、温度・圧力などの形成条件の異なるクラック群へ系統的に適用することにより、地殻深部の岩石-流体破壊現象の理解が深まることが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- (1) Uno, M.*, Okamoto, A., Tsuchiya, N., 2017. Excess water generation during reaction-inducing intrusion of granitic melts into ultramafic rocks at crustal P-T conditions in the Sør Rondane Mountains of East Antarctica. *Lithos* 284–285, 625–641. DOI: 10.1016/j.lithos.2017.04.016 (査読有)
- (2) 鈴木拓, 宇野正起*, 奥村聡, 山田亮一, 土屋範芳 (2017) 中新世後期白沢カルデラの噴出マグマの分化と現世の地熱流体貯留層. *日本地熱学会誌*, 39, 1, 25-37. DOI: 10.11367/grsj.39.25 (査読有)
- (3) Burenjargal, U., Okamoto, A., Tsuchiya, N., Uno, M., Horie, K., Hokada, T. (2016) Contrasting geochemical signatures of Devonian and Permian granitoids from the Tsel terrane, SW Mongolia. *Journal of Geosciences*, 61, 51–66, doi: 10.3190/jgeosci.210. (査読有)
- (4) Tsuchiya, N., Yamada, R., Uno, M. (2016) Supercritical geothermal reservoir revealed by granite-porphyry system. *Geothermics*,

- accepted. (査読有)
- (5) Uno, M., Iwamori, H., Toriumi, M. (2015) Transition from dehydration to hydration during exhumation of the Sanbagawa metamorphic belt, Japan, revealed by the continuous P–T path recorded in garnet and amphibole zoning. *Contrib. to Mineral. Petrol.* 170, 33, doi:10.1007/s00410-015-1185-9. (査読有)
 - (6) Kameda, J., Harris, R.N., Shimizu, M., Ujiie, K., Tsutsumi, A., Ikehara, M., Uno, M., Yamaguchi, A., Hamada, Y., Namiki, Y., Kimura, G. (2015) Hydrogeological responses to incoming materials at the erosional subduction margin, offshore Osa Peninsula, Costa Rica. *Geochemistry, Geophys. Geosystems* 16, 2725–2742, doi: 10.1002/2015GC005837. (査読有)
 - (7) Saito, T., Uno, M., Sato, T., Fujisaki, W., Haraguchi, S., Li, Y., Sawaki, Y., Yamamoto, S., Maruyama, S. (2015) Geochemistry of accreted metavolcanic rocks from the Neoproterozoic Gwna Group of Anglesey–Llyn, NW Wales, U.K.: MORB and OIB in the Iapetus Ocean. *Tectonophysics* 662, 243–255, doi: 10.1016/j.tecto.2015.08.015. (査読有)
- [学会発表] (計 20 件)
- (1) 宇野正起, 土屋範芳, 島弧地殻内のスラブ流体のマスバランス: 地殻–メルト反応帯と古カルデラ分化過程からのプロセス解析. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SCG64-09, 2018/5/21, 幕張メッセ (千葉).
 - (2) 宇野正起, 笠原久夢, 岡本敦, 土屋範芳, 吸水反応による反応誘起応力の温度依存性とその支配プロセス: MgO–H₂O 系からの制約. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SCG63-13, 2018/5/20, 幕張メッセ (千葉).
 - (3) Otagonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Masaoki Uno, Noriyoshi Tsuchiya, Mantle Wedge Metasomatic Hydration; Evidence from the Khantaishir Ophiolite, Western Mongolia. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SCG54-02, 2018/5/21, 幕張メッセ (千葉).
 - (4) Astin Nurdiana, Atsushi Okamoto, Masaoki Uno, Noriyoshi Tsuchiya Fluids transport and magma-driven metamorphism related to Granitic Pegmatite Complex in Kinka-san Island, NE Japan. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会, SCG64-P07, 2018/5/21, 幕張メッセ (千葉).
 - (5) Diana Mindaleva, Masaoki Uno, Fumiko Higashino, Takayoshi Nagaya, Ryosuke Oyanagi, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya, Time scales of Cl-bearing fluid infiltration and permeability estimated by reactive transport modelling for granulite/amphibolite-hosted reaction zones, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. 日本地球惑星科学連合 2018 年大会 SMP37-10, 2018/5/21, 幕張メッセ (千葉).
 - (6) Masaoki Uno, Noriyoshi Tsuchiya, Budget of slab-derived water in arc crust: Constraints from melt-crust reaction zones and fossil caldera differentiation processes. 15th International Workshop on WATER DYNAMICS, O-18, 2018/3/14, Tohoku University (Sendai).
 - (7) Diana Mindaleva, Masaoki Uno, Atsushi Okamoto, Takayoshi Nagaya, Noriyoshi Tsuchiya Investigation of Mass Transport and Reactive Mechanism by Cl Bearing Fluid Infiltration during Multiple Hydration Events, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. 第 8 回極域科学シンポジウム, 2017/12/6, 国立極地研究所 (立川).
 - (8) アスティン ヌルディアナ, 岡本敦, 宇野正起, 土屋範芳, 貫入岩体からの超臨界水の発生と移動: 東北日本鉾山のペグマタイト脈からの考察. 日本地熱学会平成 29 年函館大会, P23, 2017/10/18, 函館アリーナ (函館).
 - (9) 宇野正起, 岩石–流体反応帯の化学ポテンシャルプロファイルと多成分多相系の反応拡散モデル: 東南極セールロンダーネ山地, 花崗岩質ダイク–かんらん岩反応帯の例. 日本地質学会第 124 年学術大会, R2-P03, 2017/9/18, 愛媛大学 (松山).
 - (10) 宇野正起, 山田亮一, ファジャール アマンド, 奥村聡, 東北日本の古カルデラのマグマ溜まり深度・流体飽和度と地殻流体活動の関連. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会, SMP43-05, 2017/5/23, 幕張メッセ (千葉).
 - (11) Diana Mindaleva, Masaoki Uno, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya, Multiply hydration events of pyroxenite and amphibolite in the middle crustal conditions, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. 日本地球惑星科学連合 2017 年大会 SMP42-P03, 2017/5/23, 幕張メッセ (千葉).
 - (12) 宇野正起, 鈴木拓, 山田亮一, 奥村聡, 土屋範芳, メルト包有物から制約される古カルデラのマグマ溜まり深度と地殻流体活動: 東北日本, 白沢カルデラの例. 日本地熱学会 平成 28 年学術講演会, A04, 2016/10/19, 郡山市中央公民館 (郡山).
 - (13) 清水正太, 山田亮一, 宇野正起, 土屋範芳, 東北地方新第三紀花崗岩–斑岩体での超臨界地熱貯留層の形成に関するナチュラルアナログ研究. 日本地熱学会 平成 28 年学術講演会, A05, 2016/10/19, 郡山市中央公民館 (郡山).
 - (14) Mindaleva Diana, 宇野正起, 岡本敦, 東野文子, 土屋範芳, Hydration reactions of pyroxenite under granulite-facies, Sør Rondane Mountains, East Antarctica. 日本鉾

- 物科学会 2016 年年会, S2-P01, 2016/9/23–25, 金沢大学 (金沢).
- (15) 清水正太, 土屋範芳, 山田 亮一, 宇野正起, 花崗岩-斑岩中での超臨界流体の胚胎と鉱物脈形成. 日本鉱物科学会 2016 年年会, S2-08, 2016/9/23, 金沢大学 (金沢).
- (16) 清水正太, 土屋範芳, 宇野正起, 山田亮一, 深部地熱貯留層のナチュラルアナログ - 秋田県比立内花崗岩体-. 日本地球惑星科学連合 2016 年大会, SMP44-P01, 2016/5/25, 幕張メッセ (千葉).
- (17) S. Shimizu, N. Tsuchiya, R. Yamada and M. Uno, Natural analog of the deep geothermal reservoir –Hitachinai Granitic Rocks. 13th International Workshop on Water Dynamics, P-15, 2016/3/15–17, Tohoku University (Sendai).
- (18) 清水正太, 土屋範芳, 山田亮一, 宇野正起, 深部地熱貯留層のナチュラルアナログー秋田県比立内花崗岩体ー. 日本地熱学会平成 27 年学術講演会, P24, 2015/10/21, 別府国際コンベンションセンター (別府).
- (19) 宇野正起, 岡本敦, 土屋範芳, 地殻-メルト吸水反応帯における水・元素移動と反応帯形成プロセス: 東南極セールロンダーネ山地の例. 日本鉱物科学会 2015 年年会, S2-12, 2015/9/25, 東京大学本郷キャンパス (東京).
- (20) Masaoki Uno, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya, The amount and mechanisms of water supply in the arc crust: Examples from Sør Rondane Mountains, East Antarctica. 2015 Goldschmidt conference, 3156, 2015/8/19, Prague Congress Centre (Prague, Czech).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇野 正起 (Masaoki Uno)

東北大学・大学院環境科学研究科・助教
研究者番号: 50748150

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

Diana Mindaleva