

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 6 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13628

研究課題名(和文) 反応帯の微量元素浸透実験が拓く沈み込み帯の流体圧変動ダイナミズム

研究課題名(英文) Dynamism of fluid pressure in subduction zones revealed by tracer-diffusion experiments on reaction zones

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、岩石-流体反応帯から流体圧と浸透率を定量的に見積もる手法を開発・検証し、天然の変成反応帯に適用した。水熱実験では大理石をアパタイトに置換することで、拡散律速型の反応帯形成に成功し、その挙動を反応輸送モデルでモデル化した。中下部地殻相当の複数の変成反応帯を解析した結果、流体活動時間は数時間-1年であり、浸透率(\log_{10} [m²]単位)は-22~-20と従来の定説(-18)よりも二桁以上低い。一方で反応帯に伴う亀裂の浸透率は-15~-10と非常に高い。従来の定説は100万年スケールの平均値であり、数時間-年スケールでは、地殻の浸透率はダイナミックに5桁以上変動することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震波観測などで間接的に推測されていた、地殻流体圧と浸透率の変動を、岩石-流体反応帯から定量的に示した。従来、示されていた地殻浸透率の値は、百万年スケールの時空間平均であり、年-時間スケールでは、ダイナミックに変動していることを明らかにした。

本研究では、地震波から観測される地殻流体活動と、地質学的に観察される岩石-流体反応帯を、具体的な時間スケールや流体圧、浸透率をとおして定量的な比較を可能とした。

研究成果の概要(英文)：To understand the fluid activities in the deep crust, we have developed a novel method that reveals fluid pressure and permeability of the crustal material from metamorphic reaction zones. Application of reactive-transport model to crustal fluid-rock reaction zone was verified by hydrothermal experiments replacing marble by apatite. Analyses of natural metamorphic reaction zone revealed that the time-scales of fluid activities in the fractures ranged from hours to years. Permeability (in \log_{10} [m²] unit) significantly change from -22~-20 in intact crust to -15~-10 in fractures. It is suggested that the widely accepted crustal permeability (-18) is a ~Myr-scale temporal average, and crustal permeability fluctuates for more than 5 orders in the time-scales of hours to years.

研究分野：岩石学，地球化学

キーワード：沈み込み帯 地殻流体 岩石-流体反応 流体圧 浸透率 反応輸送モデル

1. 研究開始当初の背景

沈み込み带上盤における亀裂閉塞は、プレート境界の流体圧をコントロールし、地震の再来周期など、ダイナミックな変動を支配しうる。例えば、繰り返し地震の発生域では、プレート境界での破壊に伴い、上盤地殻での地震波速度低下と群発地震が繰り返しており、上盤地殻の破壊と閉塞、すなわち上盤地殻の浸透率変化が、プレート境界の流体圧を支配するとのモデルが提唱されている。しかしながら、こうした地殻の水理学的変化と、地質学的に観察される亀裂との具体的な対応関係はよくわかっていないのが現状である。

変成岩中の亀裂とその周囲の反応帯は、地下深部の流体活動の痕跡として広く解析されてきた。特に近年、局所微量元素測定が発達や、岩石-流体分配係数の制約から、従来とは異次元の精度で、流体活動の時間スケールが制約できるようになってきた。一方で、水理学的なパラメーター、特に亀裂生成に伴う流体圧・浸透率に関する研究は、手法の欠如からほぼ皆無であり、変成岩中の水理学パラメーターは制約されていない。

2. 研究の目的

本研究では、(1)天然の岩石-流体反応帯の解析による化学・水理学パラメーターの制約、(2)地殻環境下における岩石-流体反応帯形成実験から、亀裂閉塞時間と浸透率変動を定量的に評価し、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) 岩石-流体反応帯の熱力学・反応輸送解析

地殻破壊にともなう流体圧と浸透率の変動を明らかにするために、亀裂周囲の岩石-流体反応帯の鉱物・全岩化学組成を詳細に解析する。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。

反応帯の全岩化学組成プロファイルに対して、局所熱力学解析をおこない、 H_2O の活動度・流体圧を制約する。これより亀裂周囲の流体圧分布を明らかにする。

上記の流体移流速度と流体圧分布からダルシー則より母岩の浸透率を制約する。また、岩石-流体反応帯の水収支より、亀裂の浸透率を制約する。

対象は、中部下部地殻における流体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。

(2) 地殻環境下における反応帯形成実験

地殻内の岩石-流体反応を模擬し、その有効拡散係数を明らかにするために、カルサイト多結晶体とリン酸アンモニウム溶液を $150-250^{\circ}C$ で反応させる水熱反応実験をおこなう。反応フロントの距離の時間変化を、未反応核モデルで解析することで、反応時の実効拡散係数を求める。

上記とは独立に反応物・生成物の実効拡散係数をヨウ素拡散法により求める。反応時の実効拡散係数と比較することで、反応による動的な拡散係数の変化を評価する。

4. 研究成果

(1) 岩石-流体反応帯の熱力学・反応輸送解析

東南極セール・ロンダーネ山地より採取された、グラニュライト(MG), 直方輝石-角閃石片岩(OHS), カンラン石-パーガス閃石グラニュライト(OPG)から、それぞれ特徴的なハロゲンプロファイルが観察された(図1). 地質温度圧力計の解析から、これらの反応帯が形成された温度圧力条件は、それぞれ~600°C, ~0.5 GPa, ~450°C, 0.3 GPa, ~700°C, 0.5 GPa であり、中部~下部地殻に相当する。

これらのハロゲン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は、~10 時間(MG, OHS)と~1 年(OPG)程度、母岩への流体移流速度はいずれも~0.2-2 m/h であることが明らかになった(図1d, e).

反応帯の流体圧勾配は、いずれの場合も~50-100 MPa/10 cm であった。これから、流体流入継続時間は幅広いものの、その流体圧勾配や移流速度は似た値をとることが明らかになった(図1f).

得られた流体圧勾配と移流速度から、母岩の浸透率は約 10^{-22} - 10^{-20} m² と非常に低いことが明らかになった。また、クラック幅から推定される亀裂浸透率は 10^{-10} - 10^{-9} m² と非常に大きく、空間平均した破碎した地殻の浸透率は、 10^{-15} - 10^{-11} m² と見積もられる。以上より亀裂生成により浸透率が5桁以上上昇すること、その時間スケールは10 時間から1 年まで幅広い値を取りうることを示された。

(2) 岩石-流体反応帯形成実験

カルサイト多結晶体(大理石)と1Mリン酸アンモニウム溶液を飽和蒸気圧下150-250°Cで反応させ、拡散律速型の反応帯を形成することに成功した(図2). カルサイトは結晶粒子の形を保ちながら、水酸アパタイトへと置換されており、仮晶型置換反応であることがわかる(図2b). 反応フロントは時間とともに試料内部へと進行し、その時間変化は未反応核モデルでモデル化できる(図2c). その結果、反応は拡散律速であり、実効拡散係数は 3.5 - 7.1×10^{-9} m/s と制約された。実効拡散係数は温度とともに系統的に上昇し、その活性化エネルギーは38 kJ/mol である。また、実効拡散係数と溶存種(HPO₄)の自己拡散係数の比をとった拡散係数比は、 1.7 - 5.3×10^{-3} であった(図3).

静的な実効拡散係数を求めるため、常温常圧下でヨウ素拡散法による、反応物・生成物の実効拡散係数を計測した。その結果、実効拡散係数比は 5.0 - 6.0×10^{-4} であり、反応時の有効拡散係数より1桁以上も低い値であることがわかった(図3).

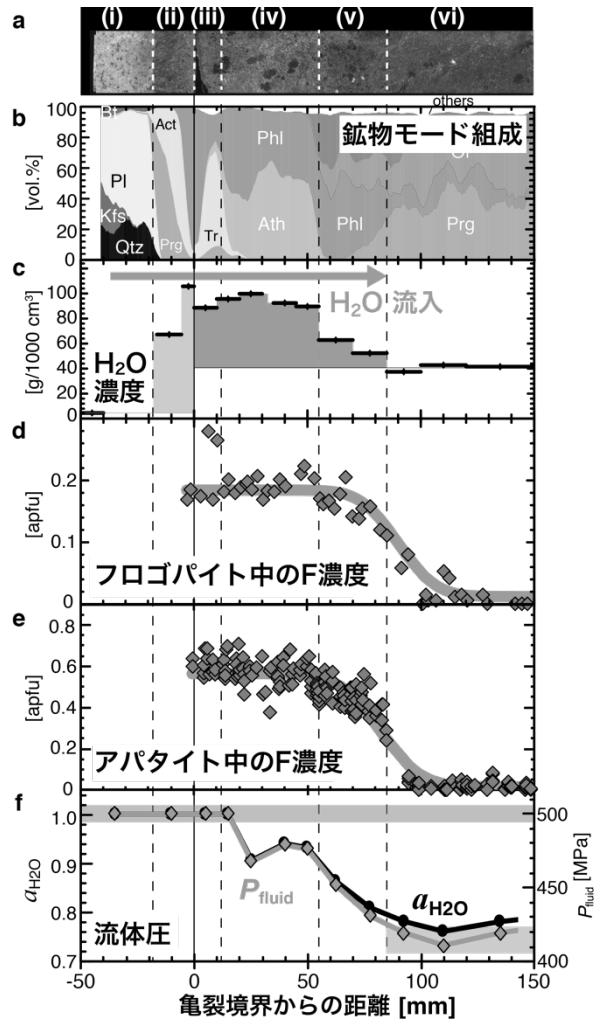


図1. カンラン石-パーガス閃石グラニュライト(OPG)における反応帯解析結果。

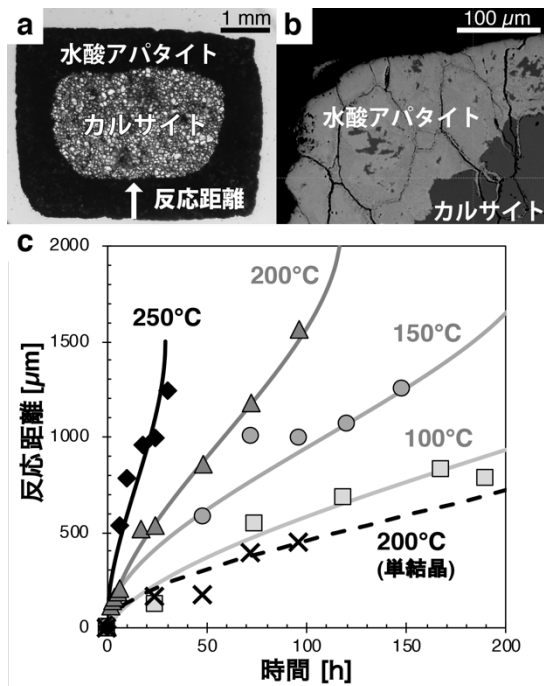


図2. カルサイト-アパタイト置換反応実験の結果。

反応物の SEM 観察や重量分析から、反応時には空隙率が約 10 vol%ほど上昇していることが示唆される。以上のことから、反応時の実効拡散係数は、静的な拡散係数より大きく、反応時の空隙生成により促進されていることが示唆される。

(3) 考察

本研究の反応帯形成実験より、反応—輸送方程式は、地殻条件下の多結晶性反応にも適用可能であることが示された。また、その実効拡散係数は、反応時の空隙生成により加速されることが示された。一方、空隙率—有効拡散係数の関係は ϕ —2 乗モデルで説明される。以上より、地殻条件下の反応帯解析についても、反応輸送モデルの妥当性が実験的に立証された。

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。本研究で見いだされた数時間～1 年の流体活動は、中部地殻条件下であり、時間スケールとしては、内陸群発地震の震源の伝播と対応することができる。一方、クラックを含む地殻の浸透率 10^{-15} – 10^{-11} m^2 は、内陸地震の震源の拡散から予測される浸透率 10^{-15} – 10^{-14} m^2 と矛盾しない (図 4)。

従来、延性領域である深部地殻の浸透率は、変成岩の化学変質解析から 10^{-18} m^2 と推定されてきた。本研究で得られた母岩の浸透率 10^{-22} – 10^{-20} m^2 は、これより有意に 2–4 桁低い。従来研究の 10^{-18} m^2 は、数百～数千万年の変成作用の時間スケールの平均値であるのに対して、本研究で得られた浸透率は数時間から年スケールである。この数値の違いは、浸透率の低い地殻 (10^{-22} – 10^{-20} m^2) が、破壊により定期的に上昇する (10^{-15} – 10^{-11} m^2) し、時間平均として 10^{-18} m^2 となっていることで説明できる (図 4)。本研究の結果は、地殻浸透率がダイナミックに変動していることを定量的に示し、従来の浸透率推定値は長時間スケールの平均値であることを示唆した。地球物理学的に観測されるような短時間の流体活動を理解するためには、本研究で制約されたような、短時間スケールの浸透率を用いる必要がある。

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、地質学的に観測される岩石—流体反応が、具体的な時間スケール、流体圧、浸透率を通して比較可能になってきた。今後、本研究の手法をさまざまな反応帯に適用することにより、地殻深部の岩石—流体破壊現象の物質科学的理解が深まることが期待される。

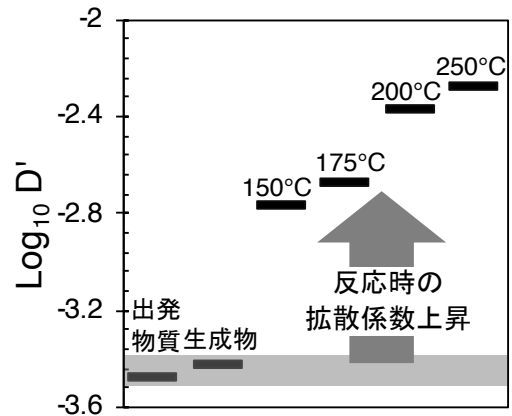


図 3. 反応前後(出発物質・生成物)および反応時の有効拡散係数比 (D')

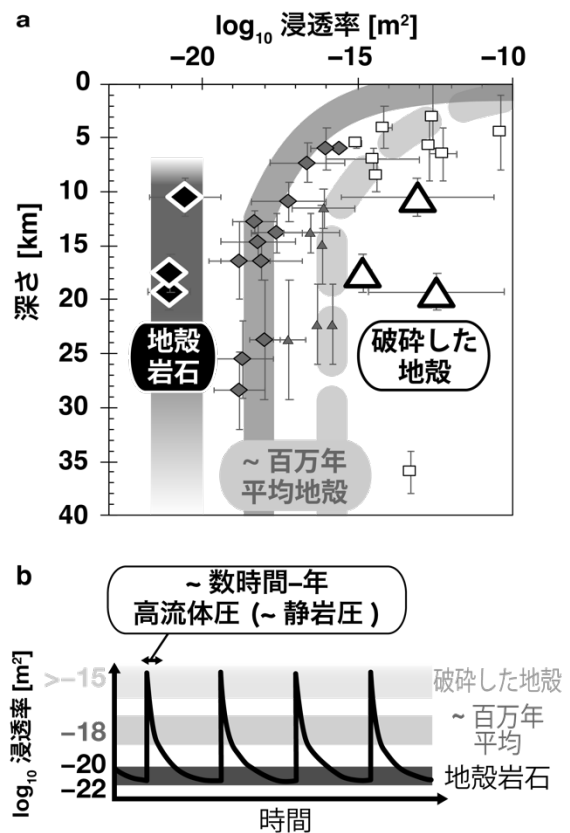


図 4. 浸透率—深度関係 (上) および浸透率の時間発展モデル (下)。黒菱形および白三角: 本研究。灰菱形, Manning & Ingebritsen (1999); 白四角, 灰三角: Ingebritsen & Manning (2010)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 6件／うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Dandar, Otgonbayar; Okamoto, Atsushi; Uno, Masaaki; Oyanagi, Ryosuke; Nagaya, Takayoshi; Burenjargal, Ulziiuren; Miyamoto, Tsuyoshi; Tsuchiya, Noriyoshi	4. 巻 174
2. 論文標題 Formation of secondary olivine after orthopyroxene during hydration of mantle wedge: evidence from the Khantaishir Ophiolite, western Mongolia	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Contributions to Mineralogy and Petrology	6. 最初と最後の頁 86
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00410-019-1623-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Amanda, Fajar F.; Yamada, Ryoichi; Uno, Masaaki; Okumura, Satoshi; Tsuchiya, Noriyoshi	4. 巻 2019
2. 論文標題 Evaluation of caldera hosted geothermal potential during volcanism and magmatism in subduction system, NE Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geofluids	6. 最初と最後の頁 3031586
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2019/6053815	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Kameda, Jun; Uno, Masaaki; Conin, Marianne; Ujiie, Kohtaro; Hamada, Yohei; Kimura, Gaku	4. 巻 71
2. 論文標題 Fault weakening caused by smectite swelling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Earth, Planets and Space	6. 最初と最後の頁 131
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1186/s40623-019-1108-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 Uno, Masaaki; Kirby, Stephen	4. 巻 334-335
2. 論文標題 Evidence for multiple stages of serpentinization from the mantle through the crust in the Redwood City Serpentinite melange along the San Andreas Fault in California	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 276-292
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2019.02.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Alviani, Vani Novita; Setiani, Putri; Uno, Masaaki; Oba, Masahiro; Hirano, Nobuo; Watanabe, Noriaki; Tsuchiya, Noriyoshi; Saishu, Hanae	4. 巻 44
2. 論文標題 Mechanisms and possible applications of the Al-H ₂ O reaction under extreme pH and low hydrothermal temperatures	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 29903-29921
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2019.09.152	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nohara, Tsuyoshi; Uno, Masaaki; Tsuchiya, Noriyoshi	4. 巻 2019
2. 論文標題 Enhancement of Permeability Activated by Supercritical Fluid Flow through Granite	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geofluids	6. 最初と最後の頁 1-16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2019/6053815	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Alviani, Vani Novita; Kosaka, Takuya; Uno, Masaaki; Oba, Masahiro; Hirano, Nobuo; Watanabe, Noriaki; Tsuchiya, Noriyoshi; Saishu, Hanae	4. 巻 41
2. 論文標題 Utilization of Geothermal Hot Spring Water for Hydrogen Production by Al-H ₂ O Hydrothermal Reaction	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of the Geothermal Research Society of Japan	6. 最初と最後の頁 101-107
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11367/grsj.41.101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Nagaya, Takayoshi; Okamoto, Atsushi; Oyanagi, Rosuke; Seto, Y; Miyake, Akira; Uno, Masaaki; Muto, Jun; Wallis, Simon;	4. 巻 -
2. 論文標題 Talc CPO determined by improved EBSD procedure for sheet silicates: Implications for anisotropy at the slab-mantle interface due to Si-metasomatism	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 American Mineralogist	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2138/am-2020-7006	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kuwatani, Tatsu; Yoshida, Kenta; Ueki, Kenta; Oyanagi, Ryosuke; Uno, Masaoki; Akaho, Shotaro	4. 巻 532
2. 論文標題 Sparse isocon analysis: A data-driven approach for material transfer estimation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chemical Geology	6. 最初と最後の頁 119345
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.chemgeo.2019.119345	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Diana Mindaleva, Masaoki Uno, Fumiko Higashino, Takayoshi Nagaya, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya	4. 巻 -
2. 論文標題 Rapid fluid infiltration and permeability enhancement during middle-lower crustal fracturing: Evidence from amphibolite-granulite-facies fluid-rock reaction zones, Sor Rondane Mountains, East Antarctica	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2020.105521	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Masaoki Uno, Stephen Kirby	4. 巻 Accepted
2. 論文標題 Evidence for multiple stages of serpentinization from the mantle through the crust in the Redwood City Serpentinite m?lange along the San Andreas Fault in California	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Lithos	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.lithos.2019.02.005	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fajar F. Amanda, Ryoichi Yamada, Masaoki Uno, Satoshi Okumura, Noriyoshi Tsuchiya	4. 巻 2019
2. 論文標題 Evaluation of Caldera Hosted Geothermal Potential during Volcanism and Magmatism in Subduction System, NE Japan	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geofluids	6. 最初と最後の頁 1~14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1155/2019/3031586	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Otgonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Undarmaa Batsaikhan, Ulziiburen Burenjargal, Noriyoshi Tsuchiya	4. 巻 47
2. 論文標題 Drone brings new advance of geological mapping in Mongolia: Opportunities and challenges	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Mongolian Geoscientist	6. 最初と最後の頁 53 ~ 57
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.5564/mgs.v0i47.1063	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計63件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 24件)

1. 発表者名 Otgonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Hydration and Ca-metasomatism in Mantle Wedge: An evidence from the Alag Khadny Accretionary Wedge, Western Mongolia
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 桑谷 立, 吉田 健太, 上木 賢太, 大柳 良介, 宇野 正起, 赤穂 昭太郎
2. 発表標題 全岩組成を用いた物質移動量のデータ駆動型解析
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Otgonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Geochronology and petrochemistry of late Paleozoic magmatic rocks of the Mandakh area, Southeast Mongolia.
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宇野 正起, 笠原 久夢, 岡本 敦, 土屋 範芳
2. 発表標題 反応誘起応力による地殻応力発生と浸透率発展: MgO-H ₂ O系での測定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Otgonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 The pressure-temperature path and mineral assemblage of the Khonichiin ovoid area, Southeastern Mongolia
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笠原久夢, 宇野正起, 岡本敦, 土屋範芳
2. 発表標題 Development of reaction-induced stress and permeability in MgO-H ₂ O system
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 根津勇介, 岡本敦, 平野伸夫, 宇野正起, 土屋範芳
2. 発表標題 Evolution of fluid chemistry during basalt-water and basalt-seawater interactions revealed by hydrothermal flow-through experiments
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 杉沢直樹, 宇野正起, 土屋範芳
2. 発表標題 Elucidation of effective diffusion coefficient along grain boundaries by hydrothermal experiment using low porosity rocks
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 A. Nurdiana, A. Okamoto, M. Uno, K. Yoshida, N. Tsuchiya
2. 発表標題 Porosity generation during feldspar replacement as the mark of potassium-rich supercritical fluids on the top of granitic intrusion
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Diana Mindaleva, Masaoki Uno, Fumiko Higashino, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Short fluid infiltration events in the low permeable metamorphic rocks triggered by crustal fracturing at amphibolite_granulite facies conditions
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fajar F. Amanda, Ryoichi Yamada, Masaoki Uno, Satoshi Okumura, and Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Evolution and total budget of fluid in granitic magma through magmatism and volcanism in subduction zone, NE Japan
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宇野 正起, Diana Mindaleva, 土屋 範芳
2. 発表標題 岩石 - 水反応帯から見積もる地殻内の流体圧勾配と浸透率
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 (JpGU) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Diana Mindaleva, Masaoki Uno, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 CRUSTAL PERMEABILITY REVEALED BY METAMORPHIC PROCESSES AND RAPID INFILTRATION OF GEOFLUIDS
3. 学会等名 Geothermal Volcanology Workshop 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 笠原久夢, 宇野正起, 岡本敦, 土屋範芳
2. 発表標題 MgO_H2O 系 における反応誘起破壊と透水率の時間発展
3. 学会等名 日本鉱物科学会 (JAMS) 2019年年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 根津勇介, 岡本敦, 平野伸夫, 宇野正起, 土屋範芳
2. 発表標題 超臨界流通式水熱実験による玄武岩 - 海水系における元素の選択的溶脱に伴う変質過程
3. 学会等名 日本鉱物科学会 (JAMS) 2019年年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Uno
2. 発表標題 Fluid pressure gradients and permeability fluctuations estimated from metamorphic fluid-rock reaction zones
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Diana Mindaleva, Masaaki Uno, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Geological evidences of short fluid activity at crustal P-T conditions in the low permeable metamorphic rocks triggered by crustal fracturing
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow Earthquakes 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宇野正起, Mindaleva Diana, 土屋範芳
2. 発表標題 岩石 - 流体反応帯から見積もる地殻内の流体圧勾配・浸透率とその変動
3. 学会等名 日本地質学会 (JGS) 第126年学術大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本 敦・大柳 良介・吉田 一貴・サティシュ クマール・宇野 正起
2. 発表標題 蛇紋岩体中のドロマイトー滑石脈の形成と泥質片岩境界との反応帯：三波川帯関東山地長瀬の例
3. 学会等名 日本地質学会 (JGS) 2019年山口大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Diana Mindaleva, Masaaki Uno, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Crustal permeability and timescales estimated from metamorphic fluid-rock reaction zones.
3. 学会等名 日本鉱物科学会 (JAMS) 2019年大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 F. F. Amanda, R. Yamada, M. Uno, and N. Tsuchiya
2. 発表標題 The Structure of Caprocks in Supercritical Geothermal Reservoir, Observed in a Granite-Porphyry System, NE Japan
3. 学会等名 日本地熱学会 (GRSJ) 2019年熊本大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 石橋 琢也, 富樫 聡, 宇野 正起
2. 発表標題 日本の地殻浸透率マップ作成に向けた基礎的検討
3. 学会等名 日本地熱学会 (GRSJ) 2019年熊本大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Fajar F. Amanda, Ryoichi Yamada, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Silicified Zone in Porphyry-Copper Deposit as a Potential Cap-Rock for Supercritical Geothermal Reservoir
3. 学会等名 International Workshop on Water Dynamics 17th (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Geri Agroli, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Thermal contraction of quartz drives transient permeability enhancement in magmatic-hydrothermal system
3. 学会等名 International Workshop on Water Dynamics 17th (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Manzshir BAYARBOLD, Atsushi OKAMOTO, Otgonbayar DANDAR, Masaaki UNO, Noriyoshi TSUCHIYA
2. 発表標題 Metamorphic evolution of the eclogite from the Khungui zone, Zavkhan Terrane, Western Mongolia
3. 学会等名 International Workshop on Water Dynamics 17th (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takayoshi Nagaya, Atsushi Okamoto, Simon Wallis, Ryosuke Oyanagi, Yusuke Seto, Akira Miyake, Masaaki Uno, Jun Muto
2. 発表標題 Talc CPO from talc-rich schists in the Sanbagawa and Franciscan metamorphic belts: implications as a weak layer formed due to Si-metasomatism at slab-mantle interfaces
3. 学会等名 International Workshop on Water Dynamics 17th (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Otgonbayar DANDAR; Atsushi OKAMOTO; Masaaki UNO; Noriyoshi TSUCHIYA
2. 発表標題 The Nature of Metasomatism in Mantle Wedge: Evidence from the Alag Khadny Accretionary Wedge, Western Mongolia
3. 学会等名 International Workshop on Water Dynamics 17th (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Atsushi Okamoto, Yusuke Netsu, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Knockout seawater experiments and insights for hydrothermal alteration of midocean ridges
3. 学会等名 International Workshop on Water Dynamics 17th (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuya Takemori, Masaaki Uno, M. Satish-Kumar, Noriyoshi Tsuchiya, Atsushi Okamoto
2. 発表標題 Crustal fracturing and brecciation processes in middle crust associated with granitoid intrusions in S_r Rondane Mountains, East Antarctica
3. 学会等名 International Workshop on Water Dynamics 17th (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Diana MINDALEVA, Masaaki UNO, Atsushi OKAMOTO, Noriyoshi TSUCHIYA
2. 発表標題 Short fluid infiltration events in the low permeable metamorphic rocks at crustal P-T conditions
3. 学会等名 International Workshop on Water Dynamics 17th (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaaki Uno
2. 発表標題 Fluid pressure and permeability evolution in the crust: insights from natural metamorphic reaction zones and hydrothermal experiments
3. 学会等名 International Workshop on Water Dynamics 17th (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Astin Nurdiana, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Role of potassium-rich fluid in pore formation of amphibole schist under supercritical condition
3. 学会等名 International Workshop on Water Dynamics 17th (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaaki Uno, Diana Mindaleva, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Crustal fluid pressure gradients and permeability estimated from fluid-rock reaction zones
3. 学会等名 16th International Workshop on Water Dynamics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Astin Nurdiana, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Kenta Yoshida, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Pore network of feldspar replacement as the mark potassium-rich supercritical fluids on the top of granitic intrusion
3. 学会等名 16th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Diana Mindaleva, Masaaki Uno, Fumiko Higashino, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Short fluid infiltration events in the low permeable metamorphic rocks at amphibolite_granulite facies conditions linked to crustal fracturing
3. 学会等名 16th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1 . 発表者名 Fajar F. Amanda, Ryoichi Yamada, Masaaki Uno, Satoshi Okumura, Noriyoshi Tsuchiya
2 . 発表標題 Water budget within the crust through magmatism and volcanism of granitic magma in subduction zone, NE Japan
3 . 学会等名 16th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Hisamu Kasahara, Masaaki Uno, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya
2 . 発表標題 Experimental investigation of reaction-induced stress and permeability developments in MgO-H ₂ O system
3 . 学会等名 16th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Naoki Sugisawa, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2 . 発表標題 Elucidation of effective diffusion coefficient along grain boundaries by hydrothermal experiment using low porosity rocks
3 . 学会等名 16th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 Otgonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2 . 発表標題 Formation of pseudomorphs after orthopyroxene during serpentinization and Ca-metasomatism of mantle wedge (the Alag Khadny accretionary wedge, the Chandman area, western Mongolia)
3 . 学会等名 16th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 Undarmaa Batsaikhan, Tsuchiya Noriyoshi, Masaaki Uno, Shuhei Sakata, Uyanga Bold, Yukio Isozaki, Otgonbayar Dandar, Hikaru Sawada
2. 発表標題 The pressure-temperature path and mineral assemblage of the Khonichin Ovoo Area, southeastern Mongolia
3. 学会等名 16th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Vani Novita Alviani, Masaaki Uno, Masahiro Oba, Nobuo Hirano, Noriaki Watanabe, Noriyoshi Tsuchiya, and Hanae Saishu
2. 発表標題 Al-H ₂ O reaction under acidic and alkaline conditions for hydrogen production
3. 学会等名 16th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yusuke Netsu, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Nobuo Hirano, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Hydrothermal flow-through experiments on basal-water and basalt-seawater interactions near critical condition
3. 学会等名 16th International Workshop on Water Dynamics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Uno, Kenta Ueki and Tatsu Kuwatani
2. 発表標題 Principal Component Analysis Reveals Diverse Mantle Melting at the Gala_pagos Plume_ridge Interaction Zone
3. 学会等名 American Geophysical Union 2018 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Diana Mindaleva, Masaaki Uno, Fumiko Higashino, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Timescales of Cl-bearing fluid infiltration estimated by multiple trace elements profiles in apatite for granulite/amphibolite-hosted reaction zones, S_r Rondane Mountains, East Antarctica
3. 学会等名 第9回極域科学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 アマンド F. F., 山田 亮一, 宇野 正起, 土屋 範芳
2. 発表標題 カルデラ堆積物中のメルト包有物を用いた水収支と 地熱エネルギーポテンシャル評価
3. 学会等名 日本地熱学会 平成30年学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 バニ ノビタ, 小坂 拓也, 宇野 正起, 平野 伸夫, 大庭 雅寛, 渡邊 則昭, 土屋 範芳, 最首 花恵
2. 発表標題 アルミニウムと温泉水による水素製造の速度論
3. 学会等名 日本地熱学会 平成30年学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土屋 範芳, 宇野 正起, Fajar Amanda
2. 発表標題 地殻に付与される流体の量 -Water Budgetに関する作業仮説-
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Otogonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Ca-metasomatism of the Mantle Wedge: an Example from the Khantaishir Ophiolite in the Chandman area, Western Mongolia
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Astin Nurdiana, Okamoto Atsushi, Uno Masaaki, Yoshida Kenta, Tsuchiya Noriyoshi
2. 発表標題 Pore throat network by feldspar replacement with potassium-rich fluids on the top of granitic magma during supercritical fluid processes
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笠原 久夢, 宇野 正起, 岡本 敦, 土屋 範芳
2. 発表標題 吸水反応における反応誘起応力の反応速度・変形速度依存性: MgO- H ₂ O系における実験的研究
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根津 勇介, 岡本 敦, 平野 伸夫, 宇野 正起, 土屋 範芳
2. 発表標題 超臨界における玄武岩の熱水変成反応プロセスと物質移動
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 ミンダリョウ ディアナ, 宇野 正起, 東野 文子, 岡本 敦, 土屋 範芳
2. 発表標題 東南極セールロンダーネ山地, グラニユライト・角閃岩相反応帯における多元微量元素解析による含Cl流体の浸透の時間スケール
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 杉沢 直樹, 東野 文子, 宇野 正起, 岡本 敦, 土屋 範芳
2. 発表標題 350 - 450 水熱反応によるアパタイト中のハロゲン置換反応実験
3. 学会等名 日本鉱物科学会2018年年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宇野正起
2. 発表標題 ギブス自由エネルギー最小化による反応帯形成のフォーワードモデル
3. 学会等名 日本地質学会第125年学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 F. F. Amanda, M. Uno, N. Tsuchiya, R. Yamada
2. 発表標題 Evaluation of deep geothermal reservoir and magma process revealed by melt inclusion-example in Fukano caldera, NE Japan-
3. 学会等名 Grand RENEWABLE ENERGY 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宇野正起, 土屋範芳
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 宇野正起, 笠原久夢, 岡本敦, 土屋範芳
2. 発表標題 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-H ₂ O系からの制約
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Otogonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Takayoshi Nagaya, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Crystal Preferred Orientation of Secondary Olivine Formed after Orthopyroxene in Mantle Wedge during Serpentinization from the Khantaishir Ophiolite, Western Mongolia
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Otogonbayar Dandar, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Mantle Wedge Metasomatic Hydration; Evidence from the Khantaishir Ophiolite, Western Mongolia
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Astin Nurdiana, Atsushi Okamoto, Masaaki Uno, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Fluids transport and magma-driven metamorphism related to Granitic Pegmatite Complex in Kinka-san Island, NE Japan
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 笠原久夢, 宇野正起, 岡本敦, 土屋範芳
2. 発表標題 MgO_H2O系における反応誘起応力の直接測定
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 根津勇介, 岡本敦, 宇野正起, 平野伸夫, 大柳良介, 土屋範芳
2. 発表標題 玄武岩-水系における熱水変成作用によるザクロ石の合成
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Diana Mindaleva, Masaaki Uno, Fumiko Higashino, Takayoshi Nagaya, Ryosuke Oyanagi, Atsushi Okamoto, Noriyoshi Tsuchiya
2. 発表標題 Time scales of Cl-bearing fluid infiltration and permeability estimated by reactive transport modelling for granulite/amphibolite-hosted reaction zones, S_r Rondane Mountains, East Antarctica
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2018年大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

〔報道〕	
(1) マグマ由来の流体による微小な割れ目網が地下水の流路に - 世界初、白亜紀の花崗岩中に超臨界流体の痕跡を発見 - , 電気新聞(2019/11/18), 岐阜新聞(2019/11/21), 科学新聞(2019/11/29).	
(2) 研究者はどんなノート? 「地質学者」, 読売KoDoMo新聞(2019/10/3).	

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	ミンダレバ ディアナ (Mindaleva Diana)	東北大学・環境科学研究科・博士課程学生 (11301)	
研究協力者	杉沢 直樹 (Sugisawa Naoki)	東北大学・環境科学研究科・修士課程学生 (11301)	
研究協力者	竹森 達也 (Takemori Tatsuya)	東北大学・環境科学研究科・学部学生 (11301)	
研究協力者	松野 哲史 (Matsuno Satoshi)	東北大学・環境科学研究科・学部学生 (11301)	