

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01185

研究課題名（和文）断層の高速摩擦すべりに伴うトライボケミカル型水素発生プロセスの解明

研究課題名（英文）Tribochemical hydrogen generation process associated with high-velocity frictional slip of faults

研究代表者

亀田 純（Kameda, Jun）

岡山大学・惑星物質研究所・教授

研究者番号：40568713

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,360,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、断層内部で起こるメカノケミカルな気体反応および生成ガスの移行・貯留プロセスについて、様々な地質環境で形成された断層岩の残留ガス分析や微小な空隙（ナノポア）の解析により検討した。その結果、250℃を超える高温環境でのH₂生成反応や、火成岩からなる断層でのCO₂のメタン化作用を示唆する痕跡などが見つかった。また、断層岩のナノポアは、200℃より高温では鉱物沈殿作用などによる閉塞が進む一方、低温では、岩石破壊によって増大しガスの移行を促進すると考えられる。特に200℃以下の断層で形成されたガスは、断層周囲や地下浅部へと拡散し、そこでの資源形成や微生物代謝系などへ影響を及ぼす可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、地球内部の水素生成作用の中でも断層活動に関連した反応に焦点をあてた。その結果、多様な地質環境における水素やその関連ガスの生成・貯留プロセスの一端が明らかとなってきた。これらの成果は、地下ガス資源の形成機構解明につながるだけでなく、地球に学ぶ新たな水素エネルギー生成技術などにつながる重要な知見と考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, gas-production reactions that proceed in a fault during earthquake occurrence and the migration and storage processes of the gases produced were investigated by residual gas analysis and nanopore analysis of fault rocks formed in various geological environments. As a result, we found traces of H₂ formation reactions at high temperatures above 250 °C and traces suggesting methane conversion of CO₂ in faults composed of igneous rocks. The nanopores in fault rocks are thought to be blocked by mineral precipitation at high temperatures around 200 °C, while at low temperatures they are enlarged by rock fracturing and facilitate gas migration. In particular, gases formed in faults at temperatures below 200 °C may diffuse efficiently into the surrounding and shallow subsurface areas of the fault, affecting the formation of resources and microbial metabolism there.

研究分野：構造地質学

キーワード：トライボケミカル反応 水-岩石反応 水素 断層 メタネーション

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

水素 (H_2) は、地下ガス資源の形成や物質循環に深く関わっている分子であり、また地球生命史を探るうえでも鍵となる物質の一つである。地球内部での非生物的水素生成作用として、水の放射線分解、超塩基性岩の水和反応、断層内のラジカル反応が知られているが、特に断層起源の水素については、発生量や発生環境、地下での移行挙動などについて不明な点が多いという課題があった。

2. 研究の目的

本研究では、様々な地質環境で形成された断層を対象として、岩石残留ガス分析および岩石中に存在する細孔 (ナノポア) の評価から、上記の課題解決を目指す。

3. 研究の方法

研究対象として、(1) プレート沈み込み境界域の堆積岩からなる断層、(2) プレート沈み込み境界域の塩基性岩からなる断層、(3) オフィオライト上昇時に形成されるマントル岩中の断層、を選び、これらの岩石中の残留ガス組成分析を行うことで、各環境のもとで断層活動に伴う岩石水作用が引き起こす水素生成反応や CO_2 のメタン化反応といったガス生成・改変プロセスを検討した。

また、(1) の断層を含む堆積岩主体の断層を対象として主にガス吸着法による岩石細孔評価を行い、プレート境界域の浅部～深部における細孔の発達過程および生成ガスの貯留・移行挙動について検討した。

4. 研究成果

(1) 過去のプレート境界巨大分岐断層近傍のガス組成と細孔構造

九州四万十帯に発達する延岡断層は過去のプレート沈み境界から派生する巨大分岐断層と考えられており、過去の地震活動の痕跡も見つかっている。本研究では、延岡断層を貫くボーリングコア試料を用いて岩石残留ガス分析や細孔分析を行った。分析の結果、ガス組成プロファイルが断層内部構造によく対応していることを確認できた (図 1a)。水素ガスは、同程度の古地温を経験したシェールガス (Suzuki et al., 2017) に比べて数倍濃集しており (図 1b)、その要因として断層活動時のラジカル反応を挙げることができる。またガス吸着法による細孔分析により、断層岩の間隙が鉱物沈殿作用などによって閉塞し、孤立したナノポアが形成されることで、生成ガスがこうしたナノポアに効果的に貯留されていることも明らかとなった。延岡断層の総変位量にもとづく岩石新生表面の生成量とそれから予想される水素生成量は、先の水素濃集量をよく説明することができ、このことも生成ガスの断層からの散逸量が小さかったことを支持する。

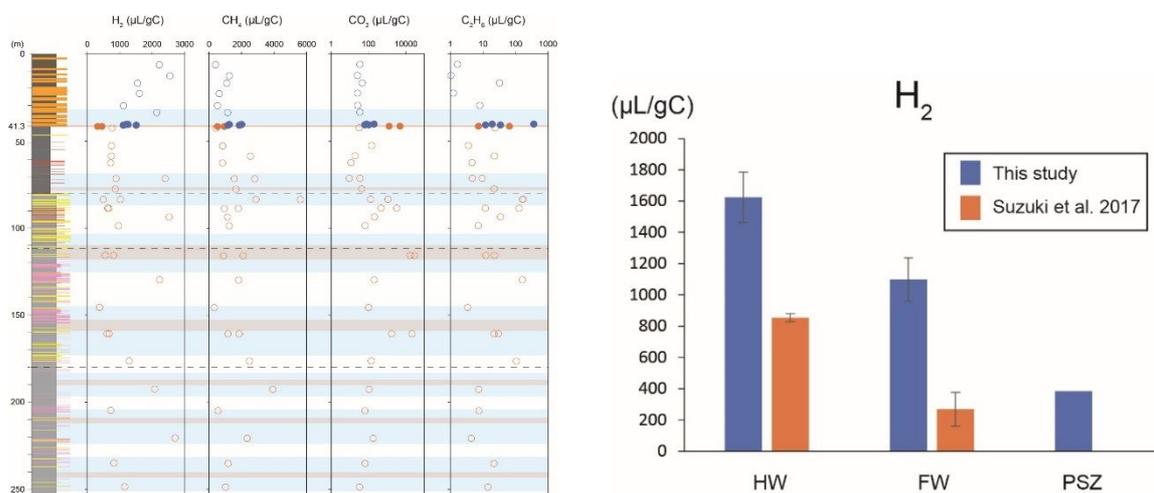


図 1 (a) 断層周囲の岩相と各掘削深度におけるガス組成。掘削深度 41.3m が断層中軸部。(b) 水素濃度の先行研究 (Suzuki et al., 2017) との比較。HW = 断層上盤 (深度 < 41.3m)、FW = 断層下盤 (深度 > 41.3m)、PSZ = 断層中軸部。

(2) 海洋プレート上面の塩基性岩中のガス生成プロセス

海洋プレート上面の塩基性岩は、プレート沈み込み境界断層の構成要素の一つと考えられている。本研究では、プレート境界域の様々な温度環境で続成～変成作用を受けた塩基性岩を対象として岩石残留ガス分析を行った。分析の結果、すべての試料から水素および炭化水素ガスが検出された(図2)。古地温と対応させると、水素はおよそ300、メタンは250程度で最大の生成量が確認された。これらの試料のXRD分析を行ったところ、塩基性岩中には250で緑簾石ができ始めており、メタンの活発な生成が緑簾石の形成に伴う鉄の酸化反応と関連している可能性がある。

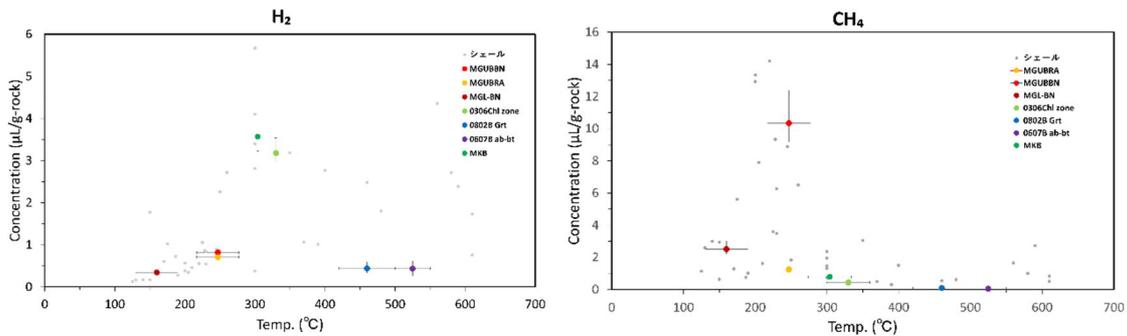


図2 古地温(横軸)でみたプレート境界近傍の塩基性岩中の水素およびメタン濃度。

また、これらの試料を用いて湿式岩石粉碎実験を行ったところ、過酸化水素が発生することが分かった。これは塩基性岩の新生表面上のラジカル種が、水素と同時に活性酸素種の生成を引き起こす可能性を示している。このような破壊に励起される酸化的流体の生成は、プレート境界断層の腐食をもたらすことで、地震活動の活発化を引き起こす可能性がある(Kameda and Okamoto, 2021; 図3)。

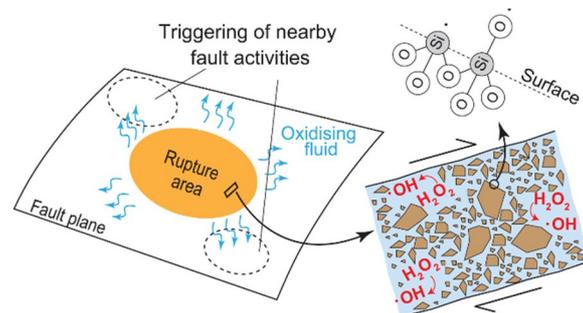


図3(右図) 本研究が提案した連鎖的断層破壊進展モデル。プレート境界型地震の発生による塩基性岩の破壊ラジカルが酸化的流体を生成し、さらなる地震活動を誘発する。

(3) オマーンオフィオライトのマンテルセクション最下部の断層近傍における岩石残留ガス組成

オマーンオフィオライト、ワジタイン岩体には陸上に上昇した海洋リソスフェア最下部のマンテル岩中に断層が観察される(図4左)。本研究では、このマンテルセクションおよび境界断層とその下部の地殻岩石まで含めた岩石試料を用いて残留ガス分析を行った。

注目される結果として、マンテルセクションにおいて高濃度のメタンが検出されたことが挙げられる。先行研究により複数の蛇紋岩化したマンテル岩体中の残留水素やメタン濃度が調査されており(Etiopie et al., 2018) 特にChromititeが存在する岩体において高いメタン濃度が報告されている。さらにこの要因としてChromititeの触媒作用によるメタン化反応が指摘されている。しかし今回調査したワジタイン岩体にはChromititeが存在せず、このようなメタンが岩体下部の断層活動と密接に関連している可能性がある。今後もこのメタンの起源などについて継続して検討する予定である。

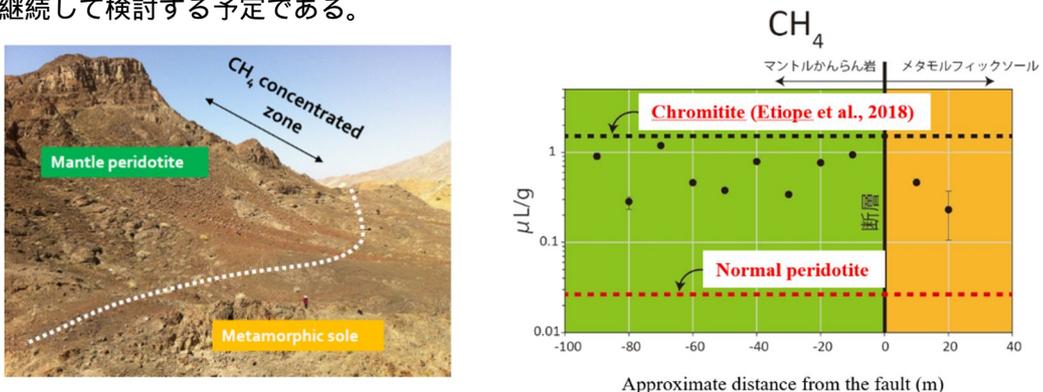


図4 (左) オマーンオフィオライト ワジタイン岩体最下部に見られるマントル岩中の断層 (白点線) 断層左がマントル岩、右が断層下盤の地殻岩石。(右) 試料中のメタン濃度。通常の蛇紋岩化したカンラン岩と比べて一桁程度濃度が高い。

(4) プレート沈み込み帯浅部~深部断層の間隙構造評価

(1) の延岡断層を含め、沈み込み帯の様々な深度で形成された堆積岩からなる断層岩およびその周囲の岩石 (Host rock) を用いて、間隙構造の発達過程を検討した。ガス吸着法ではナノポアに関する様々な情報が得られるが、ここでは特にナノポア容積と関連の深かった比表面積を例に挙げて示す。図5に、沈み込み帯の深度に対する Host rock の比表面積の変化を示す (Nakamoto, 2023)。比表面積は深度 2000~3000m あたりで急減し、さらに深度とともに減少する傾向を示す。3000m 以深のサンプルが示す比表面積は、シェールの物理的圧密のみでは説明できず、水-岩石反応による炭酸塩や石英鉱物沈殿作用がポアの閉塞を引き起していることが示唆される。

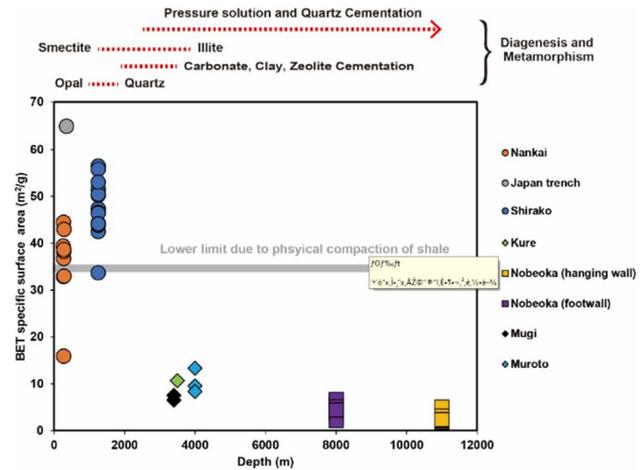


図5 (右図) 沈み込み帯の様々な深度で形成された断層の BET 比表面積。図中の中央の灰色線は、シェールの物理的圧密で達成される最小値 (Seiphoori et al., 2017)。図上部の赤線は各深度で進行すると考えられるセメンテーションをはじめとする続成作用 (Moore and Saffer, 2001)。

図6に、図5で示した Host rock のデータに加えて、断層中軸のすべり面の値を含めて両者の変化を示した (Nakamoto, 2023)。4000~5000m を境に、それより深部では地震性変形を起こした断層において Host rock に比べて BET 比表面積が上昇するのに対し、深部では同等か減少する傾向がみられる。各試料の産状や微細組織観察により、このような変化が先にあげた水-岩石反応と関連していることが分かった。沈み込み帯深部においては、延岡断層に見られるように地震活動後の水-岩石反応によるポアの閉塞が進むことで、断層由来の生成ガスの散逸は抑制されると考えられる。一方浅部では、地震活動によって断層のダイレクションが生じるものの、新たに生成したポアの充填が地震サイクルを通じて進まず、このことが生成ガスの周囲への拡散を促進するものと考えられる。

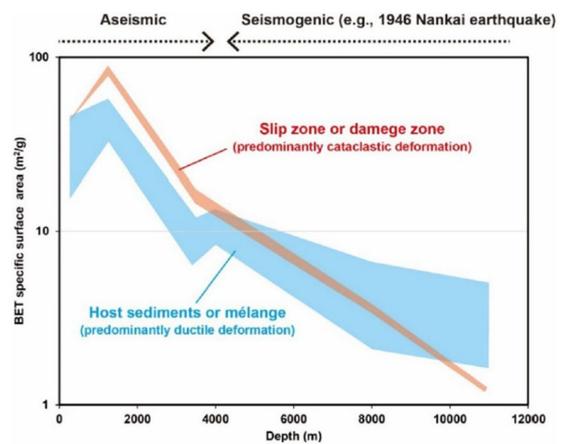


図6 (右図) 沈み込み帯の様々な深度で形成された断層すべり面 (オレンジ線) および Host rock (淡青線) の BET 比表面積。線の太さはデータのばらつきを示す。

(文献) Etiope et al. (2018) Sci. Rep. 8:8728; Kameda J. and A. Okamoto (2021) Geochem. Persp. Lett. 19, 32-35; Moore J.C. and D. Saffer (2001) Geology, 29(2), 183-186; Nakamoto K. (2023) Doctoral thesis (Hokkaido University); Suzuki N., H. Saito, T. Hoshino (2017) Int. J. Coal Geol. 173, 227-236.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Nakamoto Keisuke, Kamei Motoki, Kameda Jun	4. 巻 50
2. 論文標題 Surface Physicochemical Properties of Smectite Rich Fault Gouge: A Case Study of the Japan Trench Plate Boundary Fault	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	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) 10.1029/2023GL104271	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 Masumoto Hirokazu, Kameda Jun, Hamada Yohei, Ujiie Kohtaro, Kitamura Yujin	4. 巻 868
2. 論文標題 Lowering of the kinetic barrier of clay-mineral reactions along a seismogenic fault: Example from the Nankai subduction zone, Japan	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Tectonophysics	6. 最初と最後の頁 230083 ~ 230083
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tecto.2023.230083	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 Suzuki Noriyuki, Koike Koutaro, Kameda Jun, Kimura Gaku	4. 巻 5
2. 論文標題 Thermogenic methane and hydrogen generation in subducted sediments of the Nankai Trough	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Communications Earth & Environment	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) 10.1038/s43247-024-01252-7	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, Okamoto Atsushi	4. 巻 19
2. 論文標題 Generation of oxidising fluids by comminution of fault rocks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geochemical Perspectives Letters	6. 最初と最後の頁 32 ~ 35
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7185/geochemlet.2131	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鈴木德行・亀田純
2. 発表標題 南海トラフ沈み込み帯での熱分解起源メタン・水素の排出と移動
3. 学会等名 石油技術協会春季講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木德行・小池恒太郎・亀田純・木村学
2. 発表標題 沈み込み帯での熱分解起源のメタンと水素の生成，排出，移動
3. 学会等名 日本地質学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 亀井元紀・亀田純・中元啓輔
2. 発表標題 断層ガウジの表面物理化学特性とその断層すべり過程への影響：日本海溝プレート境界断層の例
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2023年大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ryota Hata, Jun Kameda, Yohei Hamada, Asuka Yamaguchi, Noriyuki
2. 発表標題 Residual gas composition of fault rocks along the ancient subduction zone mega-spray fault: An example from the Nobeoka thrust fault in the Kyushu Shimanto Belt
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Noriyuki Suzuki and Jun Kameda
2. 発表標題 Sustainable generation of thermogenic CH ₄ /H ₂ in the underthrust sediments, Nankai Trough
3. 学会等名 Japan Geoscience Union Meeting
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木德行・亀田 純
2. 発表標題 関東地方での海洋プレートの沈み込みに伴う持続可能な熱分解CH ₄ /H ₂ の生成
3. 学会等名 令和4年度 石油技術協会春季講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 亀田純・岡本敦
2. 発表標題 Generation of oxidizing fluids by comminution of fault rocks
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2021年大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木德行
2. 発表標題 沈み込み帯と付加体のメタンフラックス 持続可能な天然ガス資源
3. 学会等名 第51回石油・石油化学討論会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 廣瀬丈洋・中田亮一・岡崎啓史・渋谷岳造
2. 発表標題 地震断層運動に起因するオリビン結晶内の鉄の酸化還元状態変化~地震と地下生命圏のリンケージ~
3. 学会等名 日本地球化学会第68回年会（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	鈴木 德行 (Suzuki Noriyuki) (00144692)	北海道大学・理学研究院・名誉教授 (10101)	
研究分担者	廣瀬 丈洋 (Hirose Takehiro) (40470124)	国立研究開発法人海洋研究開発機構・超先鋭研究開発部門(高知コア研究所)・研究所長 (82706)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------