

平成 31 年 5 月 4 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04614

研究課題名(和文) 室内実験とAE波形解析による水圧破砕で造成される亀裂評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of hydraulic fracture evaluation by laboratory experiments and AE analysis

研究代表者

直井 誠 (Naoi, Makoto)

京都大学・防災研究所・助教

研究者番号：10734618

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：水圧破砕によって造成されるき裂とその際に発生する微小地震の関係を明らかにするため、造成亀裂の直接観察が可能な室内水圧破砕実験を行い、破砕中に生じる微小破壊(アコースティック・エミッション；以下AE)を測定し、それらから得られる情報と流体浸入域の観察結果の比較を実施した。岩種や既存き裂の方位によって破砕流体の圧力推移や、流体浸入域の様相、AE活動、卓越するAEメカニズムなどが異なることが明らかになり、既存き裂の状態によって発生するAEの特性が変化するなど、微小地震から造成き裂を推定する場合に留意すべき点が明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、破砕流体に蛍光剤添加樹脂を用いることで、造成き裂及びその周囲の流体浸入域が非常に明瞭に観察できる室内水圧破砕実験を実施し、破砕時に生じる微小破壊(アコースティック・エミッション；以下AE)を計測した。実際の資源の生産現場における水圧破砕オペレーションにおいては、微小地震を測定し、その活動をモニタリングすることでき裂の造成状況を推定するが、流体の浸入状況と破砕試験中に生じるAE活動を対比させることで、微小地震活動から造成き裂を評価するにあたって注意すべき点が明らかになった。また、岩種・既存き裂卓越状況がAE活動にどのような影響を与えるかを明らかにした。

研究成果の概要(英文)： We conducted hydraulic fracturing experiments in order to investigate the relationship between hydraulic fractures and induced microearthquakes. We monitored acoustic emissions during the experiments and compared the hypocenter distributions to fluid penetration regions that observed after the experiments. Fluid pressure history, fluid penetration region, acoustic emission activities, and their dominant mechanism significantly depended on the kind of rocks and dominant direction of preexisting fractures, revealing many important points that should be considered when estimating influence regions by microseismic activities.

研究分野：地震学・資源工学

キーワード：水圧破砕 アコースティック・エミッション き裂直接観察

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

地下の岩盤に流体を圧入して亀裂を造成する水圧破碎は、減退した石油井の生産性回復のための刺激法として古くから利用されており、シェールガス・オイルの生産や、地熱貯留層の透水性を改善する手法として重要な手段となっている。水圧破碎による亀裂造成を適切にモニタリングすることは、採算性のチェックや効率よい破碎方法の開発に必須であり、通常、これは微小地震観測によって試みられる。しかし、水圧破碎で造成されるき裂とそれによって発生する微小地震の関係の理解は未だ不十分である。例えば、開口を伴わない亀裂は生産性への寄与が小さいと考えられるなど、発生した微小地震に対応する亀裂すべてが資源回収のための有効な流路になっている保証はない。現在は、微小地震の発生場所を亀裂が造成された場所とみなすという、非常に大雑把な評価が行われているが、活発な微小地震活動がみられても生産性の回復・向上につながらないケースもあり、造成亀裂の特性を判別して生産性への寄与を正確に評価する、より高度な手法開発の必要性が高まっている。

2. 研究の目的

水圧破碎によって造成されるき裂とその際に発生する微小地震の関係を明らかにするには、実際の亀裂造成箇所の岩盤を観察できない現場データの解析だけでは難しく、直接き裂を観察し、地震活動と比較・検討することが必須である。そこで本研究では、微小破壊観測データから地下の亀裂造成状態を正しく推定する手法を確立することを目的として、造成亀裂の直接観察が可能な室内水圧破碎実験を行い、破碎中に生じる微小破壊（アコースティック・エミッション；以下 AE）を測定し、それらから得られる情報と流体浸入域の観察結果を結びつけるという研究を実施した。

3. 研究の方法

すべての実験は、一軸載荷装置を用いて一軸圧縮下で実施した。実験には、 $85 \times 85 \times 170 \text{ mm}^3$ 、あるいは $65 \times 65 \times 130 \text{ mm}^3$ の角柱形に整形し、供試体中心に流体圧入のための直径 10 mm、あるいは 6 mm の破碎孔を穿孔した供試体を用いた（図 1）。破碎流体には紫外線照射の下で発光する蛍光剤を添加した樹脂 MMA（樹脂メチルメタアクリレート、常温で約 $0.8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ）を用い、加圧区間への破碎流体の圧入には、吐出流量の制御ができるシリンジポンプを利用した。シリンジポンプには水を充填し、シリンジポンプとパッカーの間に流体変換用セルを設置した。セルはピストン構造になっており、シリンジポンプからの水の圧力を樹脂 MMA に伝える構造となっている。このセルにより樹脂 MMA を押し出し、所定の流量を供試体の破碎孔に固定した O-ring 式のパッカーに導き、破碎区間への圧入を行うことで水圧破碎実験を行った。

供試体には、16 個ないし 24 個の AE センサを取り付け、得られた Signal を 14 bit A/D ボード（National Instruments 社製 PX-5170R）を用いて 10-MS/s 連続収録した。各実験において得られた連続収録データに対して、100-4000 kHz のバンドパスフィルタをかけた後、STA（短時間平均；Short Term Average）と LTA（長時間平均；Long Term Average）の比を用いる手法によってイベントを検出し、その周囲 2048 サンプル分の波形を切り出した。次に、供試体の速度異方性を考慮した非線形最小二乗法により、AE の震源位置・発震時刻を求めた。次に、自動処理によって決定した震源を初期震源として、Double Difference 法による震源再決定を行ったものを以降の解析に使用した。また、得られた AE の相対的な大小関係の指標として、個々の AE 震源の相対マグニチュードを M を、AE 波形の振幅値から評価した。

破碎試験後には、供試体を 80°C 以上の温度で 12 時間以上加熱して供試体内部の樹脂を固結させ、破碎孔に対して直交する 5 面で切断し、紫外線照射の下で樹脂 MMA が入り込んだ部分を発光させて観察を行った。また、一部供試体については薄片を作製し、流体の浸入状況やき裂の造成状況の詳細な観察を実施した。

4. 研究成果

本課題では多数の実験を実施しているが、ここでは、 $85 \times 85 \times 170 \text{ mm}^3$ サイズに整形した山口県産黒髪島花崗岩及び宮城県産井内石の供試体に 16 個の AE センサを

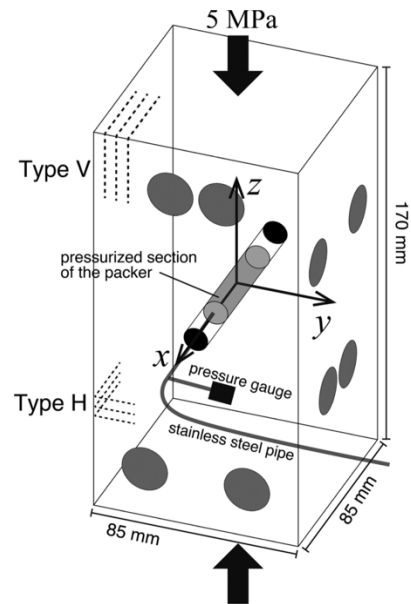


図 1. 角柱供試体を用いた一軸圧縮下における水圧破碎試験のセッティングと AE センサ配置。供試体中央の黒い円は直径 10 mm の破碎孔を表す。破碎流体の水圧は、破碎孔直近に設置した水圧計で計測している。グレーの円は AE センサの位置をあらわす（供試体の全面に設置しているもののみ図示している）。Naoi et al. (2018) より引用。

貼り付けて行った実験で得られた成果をまとめる。同実験では、供試体の弾性波速度を事前に測定し、異方性の影響を考慮して、最も速度が低い方向に垂直な面（いわゆる Rift plane に対応し、最も微小亀裂が卓越している方向とみられる）が、载荷を行う鉛直軸に平行になるもの（Type V）と垂直になるもの（Type H）を用意した。Type V の供試体は、水圧破碎に用いる破碎孔を Rift plane に平行になるよう穿孔し、破碎孔周辺の応力場から予想される水圧破碎き裂が、Rift plane 沿いに造成されるようにセッティングしており、Type H 供試体は、予想されるき裂進展方向が、Rift plane に直交するようにセッティングしている。

花崗岩供試体を用いて行った、ある実験における流体圧力の推移と AE 活動の時間変化を図 2 に示す。この実験では水の圧入速度は 2 cc/min とした。同実験においては、圧入開始時刻 ($t = 0$ s) から数百秒の間はゆっくりと圧力が上昇し、 $t = 360$ s で約 4 MPa に達してからはほぼ線形に圧力が上昇した。その後、 $t = 438$ s において流体圧がピーク圧力の約 94% に達した頃から、それまでの線形に上昇する傾向から外れて上昇レートが低下しはじめ、 $t = 455.7$ s で圧力のピーク値 10.39 MPa に達した。その後、数秒間に渡って緩やかに圧力が低下し、その後 7.2 MPa まで急激に圧力が低下（Breakdown）した。また、7.2 MPa の最低値に達した後は、流体圧は再び緩やかに上昇した。

AE 活動は $t = 435$ s、流体圧力が約 9 MPa（破碎圧力の 86.7%）に達した頃から徐々に活発化し、 $t = 443$ - 460 s（破碎圧力に達する 13 秒前から 4 秒後）の間は、高いレート（平均 165 events/s）で AE が検知されている。AE の規模は時間とともに上昇し、Breakdown 後に低下するという変化を示した。 $t = 420$ s 頃から breakdown にかけて、破碎孔から供試体表面に向かって z 軸方向沿いに震源が移動した様子が観察されており、この向きに亀裂が進展したことが伺われる。

花崗岩における実験で得られる圧力変化は、AE が発生し始める圧力 (P^{AE})、圧力上昇が線形から乖離し、岩体に流体が顕著に浸入し始める圧力 (P^{leak})、圧力のピーク値 (P^{BD})、及び圧力降下量 (P^{drop}) で特徴づけられ、Rift plane 沿いに亀裂が進む場合（Type V）に、いずれの値も小さくなる傾向がみられた（図 3）。また、井内頁岩を用いた実験においては、 P^{AE} 、 P^{leak} 、 P^{BD} はほぼ等しく、花崗岩に比べて主破壊が準備過程なしに急に生じる傾向が観察された。

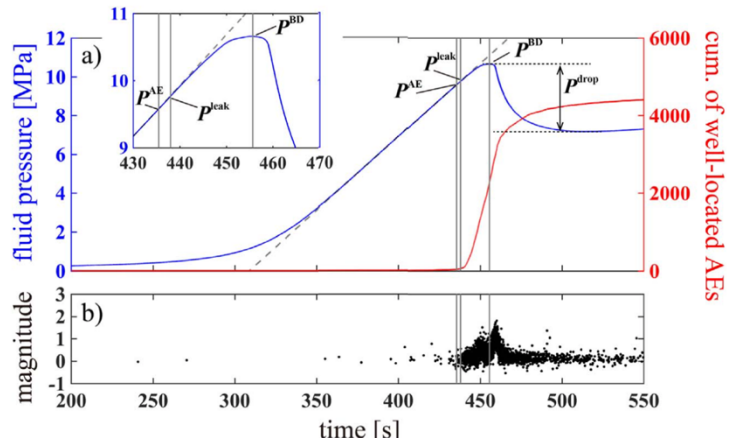


図 2. a) ある花崗岩供試体を用いた実験における、破碎流体の時間変化（青線）と AE 積算個数図（赤線）。黒い点線は、破碎流体圧が線形に上昇している部分の近似直線である。Inset) ブレイクダウン周辺の流体圧変化の拡大図。b) 同実験で得られた AE の Magnitude-time diagram. Naoi et al. (2018) より引用。

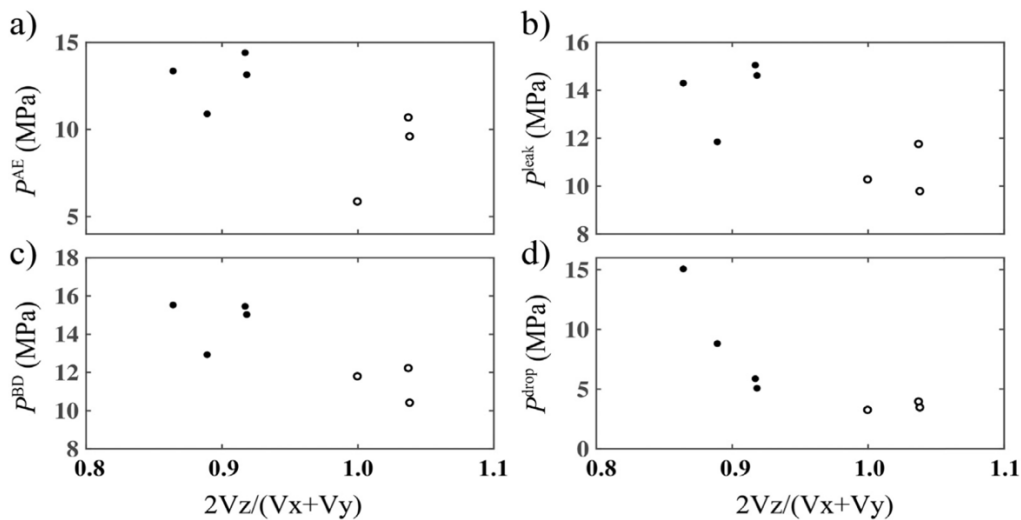


図 3. 花崗岩供試体を用いた実験における、流体圧時間変化を特徴づけるパラメータと、供試体の P 波速度異方性との関係。それぞれの流体圧パラメータは、鉛直方向の P 波速度 V_z と、水平方向の P 波速度（直行する 2 方位の速度 V_x , V_y の平均値）の比に対してプロットしている。黒い点は、P 波速度から推定される Rift plane 方向（多くの花崗岩で見られる最も割れやすい方向）が水平方向であるもの（Type H）、白丸は、Rift plane が垂直方向であるもの（Type V）。a) P^{AE} , b) P^{leak} , c) P^{BD} , d) P^{drop} の結果。Naoi et al. (2018) より引用。

花崗岩を用いた試験後に行った流体浸入領域の観察では、広い範囲に破碎流体が広がっている様子が見られた (図4). その一方、井内頁岩では、非常に細い、明瞭な主亀裂のみが観察された (図5). 供試体間でみられた圧力変化やAE発生パターンの違いは、岩石の浸透率や粒径の違いが原因である可能性が考えられる. また、流体が顕著に浸入しているにもかかわらず、AEが発生していない領域が顕著に認められ、AE発生域が流体浸入域に必ずしも一致しないことが明瞭に示された. このことは、微小地震活動のみから水圧破碎による亀裂造成領域を把握することが難しいことを示唆している.

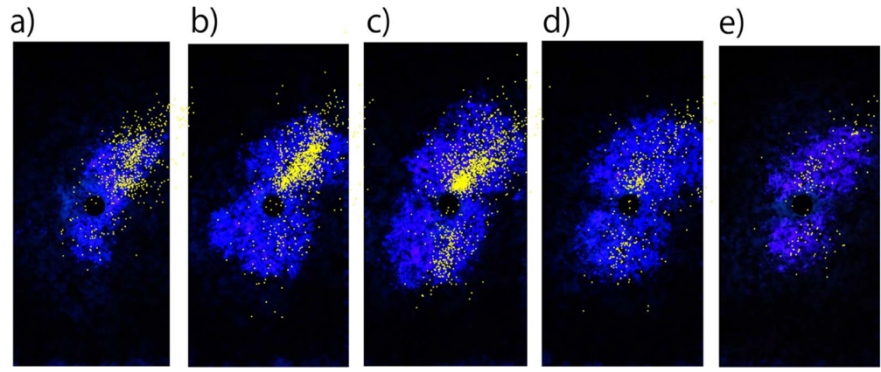


図4. ある花崗岩供試体を用いた試験で得られた、破碎流体の浸入域. 青白く発光した部分が流体の浸入域に対応する. a) -e) は破碎孔に直行する鉛直平面で、均等にカットした結果に対応する (cが中央). 各断面から7 mm以内で求めたAE震源を黄色の点で重ねてプロットしている. Naoi et al. (2018)より引用.

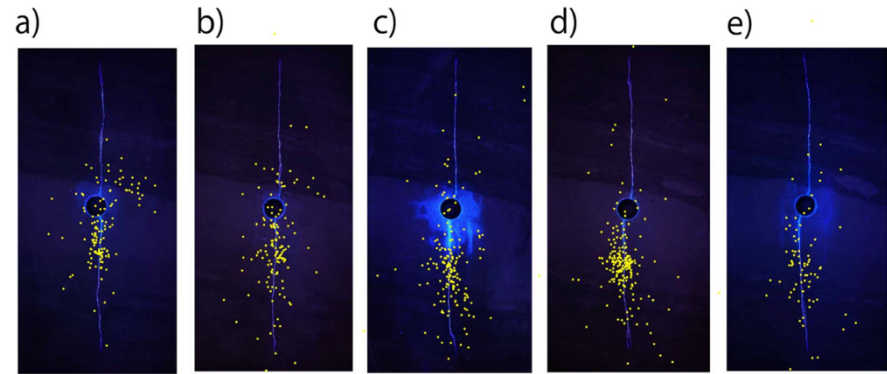


図5. 井内頁岩供試体を用いた断面観察結果. Naoi et al. (2018)より引用.

また、上記花崗岩供試体による実験時に得られたAEデータを用いて、き裂の造成に伴って生じるAcoustic Emission (AE) のモーメントテンソルを、AEセンサの特性を注意深く補正した上で評価することで破壊のモードを調べた. その結果、造成き裂の進展方向と先なき裂卓越方向が直交するケース (Type H) では、円孔周りの応力場から予想されるような最大主圧縮軸沿いに伸びる開口型クラックが多く発生したのに対し、き裂進展方向と先なき裂卓越方向が平行なケース (Type V) では、剪断型が卓越する顕著な傾向がみられた (図6). これは、造成き裂の進展方向と微小先なき裂の配向方向の関係によって、水圧破碎時に生じるAcoustic Emission、あるいはMicroseismicのメカニズムが顕著に変化することを示唆する.

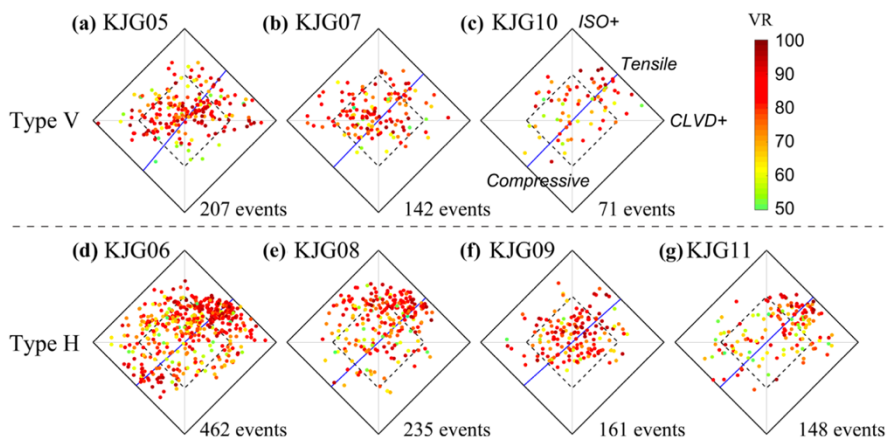


図6. 花崗岩供試体を用いたメカニズム解析結果のSource Type Plot. 中心の点線で囲まれている部分が剪断成分が50%以上含まれているイベントで、右上にプロットされているものは引張破壊に対応する成分が多く含まれているイベントに対応する. 点の色は、メカニズム解析 (Moment テンソル解析) 時に得られた、波形の一致度をあらわすVRの値に対応する. 一枚のクラック面において、剪断滑りと引張破壊が同時に発生する、理想的なshear-tensile型の震源に対応する解は、青い点線上に位置する. 上段がType V供試体、下段がType H供試体に対する結果をあらわす. Yamamoto et al. (2019)より引用.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

- [01] K. Yamamoto, M. Naoi, Y. Chen, K. Nishihara, S. Yano, H. Kawakata, T. Akai, I. Kurosawa, T. Ishida (2019) Moment Tensor Analysis of Acoustic Emissions Induced by Laboratory-based Hydraulic Fracturing in Granite, *Geophys. J. Int.*, 216, 1507-1516, doi: 10.1093/gji/ggy493.
- [02] Y. Chen, M. Naoi, Y. Tomonaga, T. Akai, H. Tanaka, S. Takagi, and T. Ishida (2018) Method for Visualizing Fractures Induced by Laboratory-Based Hydraulic Fracturing and Its Application to Shale Samples, *Energies*, 11, 1976, doi:10.3390/en11081976.
- [03] M. Naoi, Y. Chen, K. Nishihara, K. Yamamoto, S. Yano, S. Watanabe, Y. Morishige, H. Kawakata, T. Akai, I. Kurosawa, T. Ishida (2018) Monitoring hydraulically-induced fractures in the laboratory using acoustic emissions and the fluorescent method, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 104, 53-63. doi: 10.1016/j.ijrmmms.2018.02.015.
- [04] 陳友晴, 直井誠, 石田毅, 赤井崇嗣, 黒澤功, 高木是 (2017) 水圧破砕フラクチャーの可視化技術, *石油技術協会誌*, 82, pp. 438-442.

〔学会発表〕 (計 15 件)

- [01] M. Naoi, K. Imakita, K. Yamamoto, H. Kawakata, Y. Chen, Y. Morishige, N. Tsutsumi, T. Ishida, H. Tanaka, Y. Arima, D. Hyodo (2018) Estimation of moment magnitude of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in the laboratory, *JpGU 2018, Makuhari-Messe, May 23, 2018.*
- [02] 今北啓一, 直井誠, 陳友晴, 山本和敏, 森重有矢, 堤直史, 川方裕則, 石田毅, 田中浩之, 有馬雄太郎, 兵藤大祐 (2018) 室内水圧破砕において生じる AE のモーメント・マグニチュード推定, *資源・素材学会 第 15 回若手研究者・学生のための研究発表会, 滋賀県立大学, 2018 年 12 月 7 日.*
- [03] 山本和敏, 直井誠, 今北啓一, 陳友晴, 石田毅, 川方裕則, 田中浩之, 有馬雄太郎, 兵藤大祐 (2018) イーグルフォード頁岩および黒髪島花崗岩を用いた室内水圧破砕実験時に生じる Acoustic Emission の震源メカニズム推定, *資源・素材学会 第 15 回若手研究者・学生のための研究発表会, 滋賀県立大学, 2018 年 12 月 7 日.*
- [04] 本庄佑馬, 直井誠, 石田毅 (2018) Acoustic Emission センサで測定されたデータへの相対モーメントテンソル解析の適用, *資源・素材学会 第 15 回若手研究者・学生のための研究発表会, 滋賀県立大学, 2018 年 12 月 7 日.*
- [05] 陳友晴, 直井誠, 川方裕則, 石田毅, 赤井崇嗣, 田中浩之, 有馬雄一郎, 高木是 (2018) 水圧破砕亀裂の可視化研究, *資源・素材学会秋季大会, 2018 年 9 月 12 日.*
- [06] 陳友晴, 森重有矢, 堤直史, 直井誠, 山本和敏, 今北啓一, 川方裕則, 石田毅, 田中浩之, 有馬雄太郎, 兵藤大祐 (2018) 水圧破砕によって頁岩供試体中に発達する亀裂の可視化と顕微鏡観察, *2018 年度石油技術協会春季大会, 2018 年 6 月 13 日.*
- [07] 陳友晴, 森重有矢, 堤直史, 直井誠, 山本和敏, 今北啓一, 川方裕則, 石田毅, 田中浩之, 有馬雄太郎 (2018) 水圧破砕亀裂可視化研究のための真三軸水圧破砕実験システムの構築, *2018 年度材料学会, 2018 年 5 月 26 日.*
- [08] 今北啓一, 直井誠, 陳友晴, 山本和敏, 森重有矢, 堤直史, 川方裕則, 石田毅, 田中浩之, 有馬雄太郎, 兵藤大祐 (2018) イーグルフォード頁岩供試体に対する, AE 計測と蛍光観察による水圧破砕造成亀裂の観察, *資源・素材学会春季大会, 2018 年 3 月 28 日.*
- [09] 山本和敏, 直井誠, 今北啓一, 陳友晴, 石田毅, 川方裕則, 田中浩之, 有馬雄太郎, 兵藤大祐 (2017) イーグルフォード頁岩を用いた室内水圧破砕実験時に生じる Acoustic Emission の震源メカニズム推定, *資源・素材学会 第 14 回若手研究者・学生のための研究発表会, キャンパスプラザ京都, 2017 年 12 月 15 日.*
- [10] 本庄佑馬, 直井誠, 石田毅 (2017) Acoustic Emission 測定データに対する相対モーメントテンソル解析の適用, *資源・素材学会 第 14 回若手研究者・学生のための研究発表会, キャンパスプラザ京都, 2017 年 12 月 15 日.*
- [11] 陳友晴・直井誠・石田毅・赤井崇嗣・黒澤功・高木是 (2017) 水圧破砕フラクチャーの可視化技術, *石油技術協会春季講演会シンポジウム, 東京, 2017 年 6 月 14 日~15 日.*
- [12] 山本和敏, 直井誠, 西原健吾, 陳友晴, 藤戸航, 川方裕則, 赤井崇嗣, 黒澤功, 石田毅 (2017) 室内水圧破砕実験におけるき裂造成メカニズムのモーメントテンソル解析による検討, *石油技術協会春季講演会, 東京, 2017 年 6 月 14 日~15 日.*
- [13] M. Naoi, K. Nishihara, K. Yamamoto, W. Fujito, Y. Chen, T. Ishida, H. Kawakata, T. Akai, I. Kurosawa (2017) Moment tensor analysis of acoustic emissions induced by hydraulic fracturing in laboratory experiments, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017, SSS17-P11, Makuhari-Messe, 21 May 2017.*

- [14] 山本和敏, 直井誠, 西原健吾, 陳友晴, 渡邊翔太, 森重有矢, 藤戸航, 川方裕則, 赤井崇嗣, 黒澤功, 石田毅 (2017) P 波速度異方性の卓越方向が異なる花崗岩を用いた室内水圧破碎実験, 資源・素材学会春季大会, 2017年3月29日.
- [15] 直井誠 (2016), 水圧破碎亀裂の可視化に関する研究 (2), Jogmec TRC week 2016, 独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構技術センター, 2016年10月14日.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

特になし.

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：石田毅

ローマ字氏名：Ishida Tsuyoshi

所属研究機関名：京都大学 (2019年3月31日付で退職)

部局名：工学研究科

職名：教授

研究者番号 (8桁)：10232307

研究分担者氏名：川方裕則

ローマ字氏名：Kawakata Hironori

所属研究機関名：立命館大学

部局名：理工学部

職名：教授

研究者番号 (8桁)：80346056

研究分担者氏名：陳友晴

ローマ字氏名：Youqing Chen

所属研究機関名：京都大学

部局名：エネルギー科学研究科

職名：助教

研究者番号 (8桁)：80293926

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：森谷 祐一

ローマ字氏名：Moriya Hirokazu

研究協力者氏名：椋平 祐輔

ローマ字氏名：Mukuhira Yusuke

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。