

特別寄稿 1

CO₂を用いた水圧破碎によるシェールガスや地熱開発に向けた実験

京都大学大学院 工学研究科 教授 いしだ つよし
石田 毅



1. はじめに

シェールガスは新しい天然ガス資源として注目を集めており、その生産量の拡大により、世界のエネルギーの需給関係を大きく変化させることから、シェールガス革命とも呼ばれている。シェールガスは北米やヨーロッパの固いシェール（頁岩）層に含まれている天然ガスを採掘するもので、ガスを含んでいる地層を水圧で破碎しないと採掘できない。また高温で乾燥した岩体（Hot Dry Rock）から地熱を抽出して発電を行う高温岩体発電においても、岩盤を水圧で破碎する必要がある。これらの開発に現在利用されている水を用いた水圧破碎の代わりに、地球温暖化の原因とされるCO₂（二酸化炭素）を利用することができれば、水の不足する砂漠地帯での開発に有利なだけでなく、CO₂を地中に隔離することができるため環境にやさしい技術となる。このようなCO₂の利用はCCS（Carbon Capture and Storage）に対して、CCUS（Carbon Capture, Utilization and Storage）と呼ばれ¹⁾、CO₂の回収、運搬、貯蔵に必要なコストが回収できるため地球温暖化防止を実現するうえで有用である。

筆者らの研究グループは、CO₂で岩盤を破碎すると、水で破碎するより細かい亀裂が広い範囲に3次元的に広がり、シェールガスの生産や高温岩体発電に有利な亀裂が造成されることを室内実験^{2) 3)}で明らかにした。また小規模な現場実験⁴⁾も行って、CO₂による亀裂造成の特徴を調べているのでその概要を紹介する。

2. CO₂を用いた水圧破碎の室内実験^{2) 3)}

2.1 供試体と実験方法の概要

供試体には一辺170mm角の立方体の山口県産の黒髪島花崗岩を用い、中央に直径20mmの水圧破碎孔を穿った。花崗岩にはリフト面と呼ばれる弱面が存在し、図1に示すようにこのリフト面をYZ面に設定した。造成される亀裂の特徴を把握するため、岩盤の微小破壊時に放射される弾性波動（高周波の音、Acoustic Emission；以下AEと略する⁵⁾）を測定することとし、供試体側面にはそのためのセンサーとして16個の圧電素子（共振周波数300kHz）を貼り付けた。圧電素子の設置位置に穴を空けた載荷板

で供試体を覆い、載荷時に圧電素子に圧力がかからないように工夫した。地下の圧力条件を模擬するため、油圧式ハンドポンプとフラットジャッキを用いて、供試体に水平2方向に $S_H=3\text{MPa}$ と $S_H=6\text{MPa}$ 、破碎孔を掘削した鉛直方向には $S_V=4\text{MPa}$ を載荷し、実験開始から終了まで一定に保った。また破碎孔の中央部には、上下端にOリングをはめ込んだ加圧区間60mmのパッカーを設置し、パッカー上部に熱電対を取り付けて圧入流体の温度を測定した。

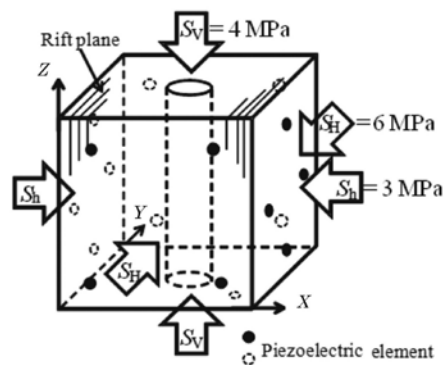


図1 座標系と供試体への載荷条件、AEセンサーとして使用した圧電素子の設置位置^{2) 3)}

2.2 流体圧入方法と供試体への載荷方法

CO₂は図2に示すように、圧力7.38MPa、温度31.0℃以上で超臨界状態となる。CO₂が圧入される地表下3000mを超える地下深部は、この臨界点を上回る高温・高压状態であるためCO₂は超臨界状態となる。超臨界CO₂は水の5～10%程度という非常に小さい粘度を有するため、このような粘度の小さい、さらさらした流体を圧入した際に造成される亀裂は、水を圧入した場合に造成される亀裂と異なる可能性がある。そこでシリンジポンプから液体状態で吐出したCO₂を加熱し、供試体の破碎孔内に設置したパッカーへ導き圧入した。孔内への注入圧はプレッシャーゲージを用いて測定し、岩石が破碎して流体圧が低下すると直ちに注入を停止した。またこの実験と比較するため、常温の液体状態のCO₂、常温の水及び水の約300倍の大きな粘度を有する常温の油（自動車のトランスミッション・オイル）を用いた破碎実験を行った。なお、いずれの実験も注入流量は10cc/分とした。

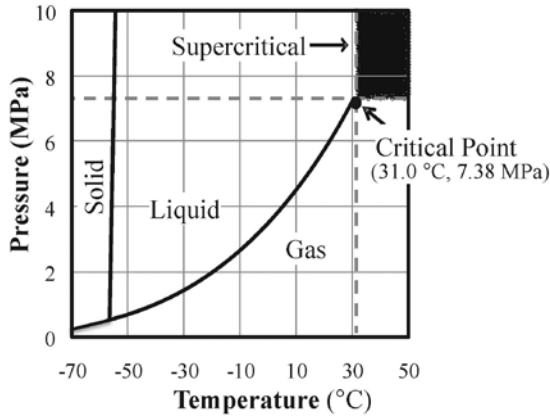


図2 二酸化炭素の相図^{2) 3)}

2.3 実験結果

本実験では超臨界 CO₂、液体 CO₂、水、油でそれぞれ 2 回ずつ、合計 8 回の破碎実験を行った。一例として超臨界 CO₂ による破碎時の CO₂ の注入圧、供試体に載荷した拘束圧、パッカー上部で測定した CO₂ の温度と AE 発生率の経時変化を図 3 に示す。流体圧の最大値は 9.1MPa であり、これを破碎圧力とした。また破碎時の温度は 35.5°C であり、圧力と温度が図 2 の臨界点を上回っていることから、破碎は超臨界状態の CO₂ によって生じたことが分かる。図 3 を見ると破碎直後に温度が低下しているが、これは亀裂発生に伴う CO₂ の漏洩により CO₂ が断熱膨張したためと思われる。図には 1 秒あたりの AE 発生率も示したが、破碎直後に大量に AE が発生し、以後数十秒間にわたって継続していることが分かる。

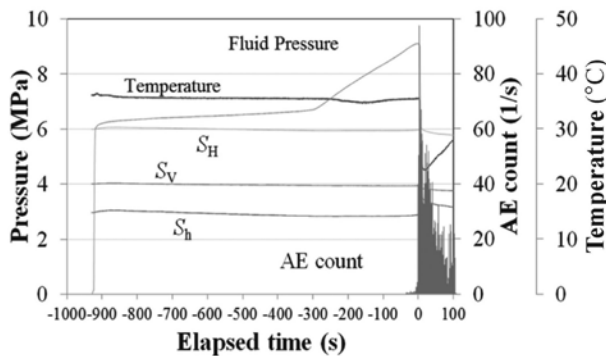


図3 超臨界 CO₂ による破碎時の CO₂ の注入圧、供試体に載荷した拘束圧、パッカー上部で測定した CO₂ の温度と AE 発生率の経時変化^{2) 3)}

この実験で発生した AE 震源分布の XY, YZ, ZX 面への投影図と供試体表面で確認された亀裂を図 4 に比較して示す。XZ 面において Y=0mm の面では亀裂が見られたが、Y=170mm の面においては亀裂は見られなかった。XY 面に関しては図中の黒い線が Z=170mm の面の、灰色の線が Z=0mm の面の亀裂を示している。また震源も円孔を中心とする YZ 面に沿って分布しており、おおむね

亀裂と一致していることが分かる。これは供試体の弱面であるリフト面と一致し、供試体の X, Y 及び Z の 3 方向に載荷している拘束圧の条件から予測される亀裂進展方向とも一致している。

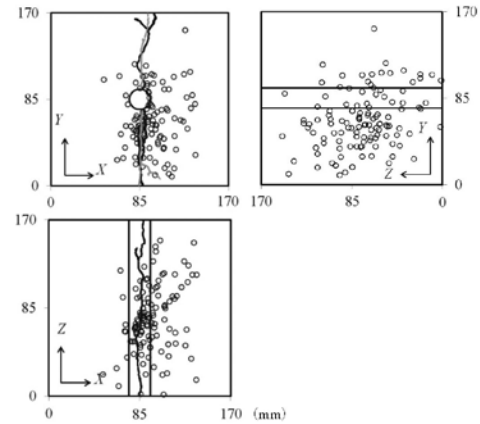


図4 AE 震源分布の XY, YZ, ZX 面への投影図 (○印) と供試体表面で観察された亀裂 (黒と灰色の実線)^{2) 3)}

2.4 考察

図 5 に実験で得られた破碎圧力の値と破碎流体の粘度の関係を示す。図 5 (a) から、超臨界 CO₂ (SC-CO₂)、液体の CO₂ (L-CO₂)、水 (Water)、油 (Viscous Oil) の順に破碎流体の粘度が大きくなるにしたがって、破碎圧力の値も大きくなっていることがわかる。なお、同じ流体でも実験時の温度により多少粘度が異なっている。

AE 震源分布から造成された亀裂の状態を推測するため、まず AE の震源が平面上に分布すると仮定し、震源から下した垂線の長さの 2 乗和が最小となる平面 (最尤平面) を最小二乗法で求めた。そして震源とこの平面との距離 r の平均値 L_{av} を求めた。横軸に破碎流体の粘度をとり、縦軸に L_{av} の値を示すと図 5 (b) のようになる。この結果は、超臨界 CO₂ のように粘度の小さい破碎流体でフラクチャリング (水圧破碎) を行うと、亀裂が平面から逸脱して広がりながら進展することを示している。

次に、AE 震源分布がフラクタル (自己相似) 性を有していることを確認し、フラクタル次元を相関関数法により求めた。横軸に破碎流体の粘度をとり、縦軸に震源分布のフラクタル次元を示すと図 5 (c) のようになる。フラクタル次元は、AE 震源が直線上に分布している場合は 1、平面上に分布している場合は 2、3 次的に分布している場合は 3 となり、整数以外の値も取りうる。図 5 (c) は粘度が小さいほどフラクタル次元が大きくなることを示しており、破碎流体の粘度が低いほど AE はより 3 次的に広く分布する傾向が認められる。

また亀裂造成のメカニズムを調べるため、測定した AE 波の P 波初動の極性を調べた。AE 震源を 3 次的に取り囲んで十分多くのセンサーが配置されている場合、せん断破壊で AE が発生すると P 波初動の極性は押しが

50%、引きが50%と半々になるが、引張破壊でAEが発生すると押しが100%となる。そこで、それぞれの実験でP波初動の押し引きが明瞭に読み取れる約30個の振幅の大きなAEを対象に、P波初動の押しの割合を調べた。図5(d)は横軸に破砕流体の粘度をとり、その結果を示したものである。この図から、破砕流体の粘度が大きいほどP波初動の極性に占める押しの割合が多くなる、すなわち引張破壊が卓越する傾向のあることがわかる。

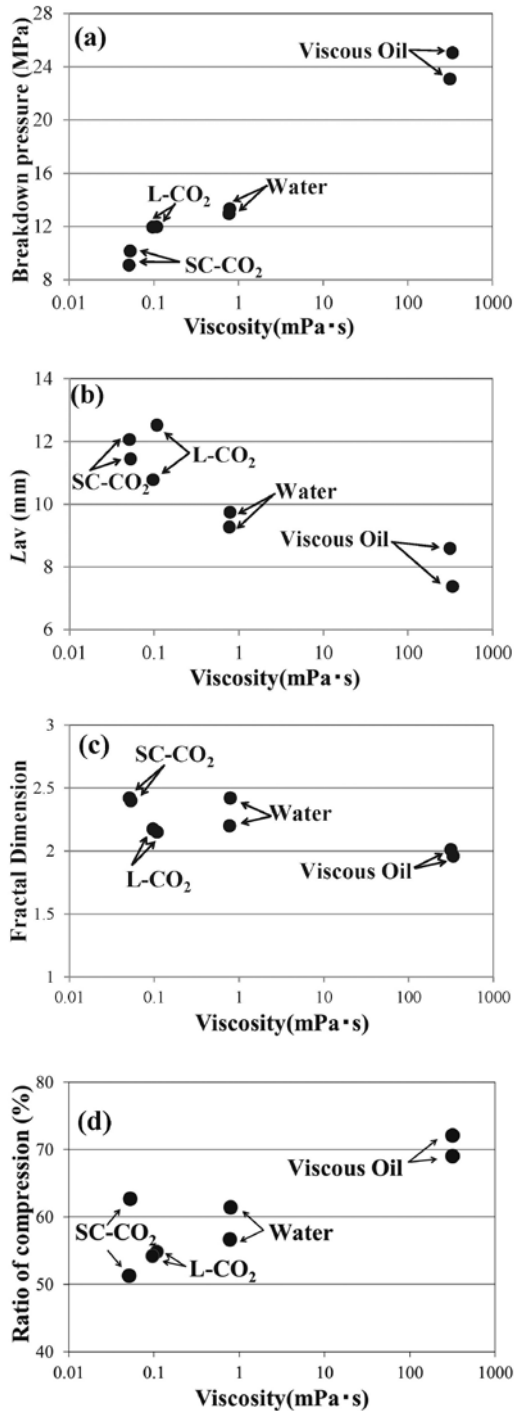


図5 破砕流体の粘度の違いによる破砕圧、AE震源分布及び破壊メカニズムの違い

(a) 破砕圧、(b) AE震源と最尤平面との平均距離 Lav、(c) フラクタル次元、(d) AEのP波初動の極性における押し波の割合³⁾

以上のことから、粘度の大きい流体を用いた場合は引張破壊が卓越しAE震源が平面的に分布するのに対して、超臨界CO₂のような粘度の小さい破砕流体を用いた場合には、せん断破壊が卓越してAEの震源が平面から逸脱し、3次的に分布する傾向がみられたといえる。Warpinskiら⁶⁾は、現実のシェールガス田で水と我々の実験における油に対応する粘度の大きなゲルで水圧破砕を行い微小地震の震源分布を水による水圧破砕の場合と比較している。この結果をみると、粘度の大きなゲルの場合には平面的に狭い範囲に微小地震の震源が分布しているのに対し、粘度の小さい水の場合には3次的に広く分布する傾向がみられ、我々の実験結果と調和的である。このことから、粘度の小さなCO₂でフラクチャリングを行えば、広い範囲に3次的に広がるシェールガス生産や高温岩体発電に有利な亀裂が造成される可能性が高いといえる。

3. CO₂を用いた水圧破砕の現場実験⁴⁾

3.1 実験サイトと実験方法の概要

室内実験では、破砕孔から供試体の表面にまで短時間に亀裂が進展するため、CO₂と水による水圧破砕の範囲の大きさの違いを検討することができない。また、実際のシェールガス開発や高温岩体開発の現場では、岩盤内の既存亀裂が水圧破砕亀裂の成長に大きな影響を与えらると思われるが、室内実験でCO₂と水による既存亀裂への影響の違いを検討することは容易ではない。

そこで、CO₂の超臨界温度31℃を上回る高温の花崗岩を有する中部山岳地帯のトンネルの下盤に深さ約8mのボーリング孔を掘削し、超臨界CO₂で水圧破砕する実験を行った。実験では図6に示すように、CO₂を圧入する直径86mmの圧入孔と、それを取り囲むように圧入孔から1m離れた正方形の頂点の位置に直径66mmのAE測定孔を4本掘削した。4本の測定孔にそれぞれAEセンサーを4個ずつ計16個、破砕区間を3次的に取り囲むように設置し、破砕によって発生したAEを測定した。

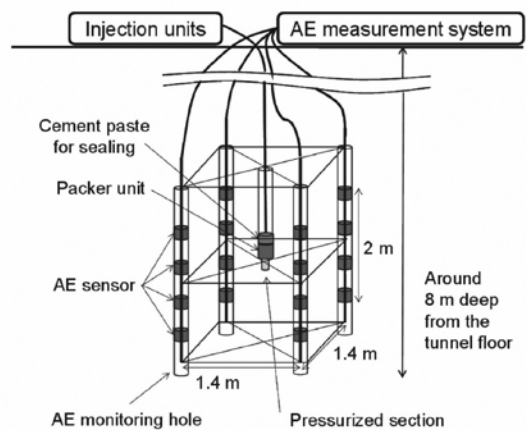


図6 現場実験の概要図⁴⁾

CO₂による破砕区間を取り囲むように破砕孔から1m離れた4本の測定孔にそれぞれセンサーを4個ずつ、合計16個設置して破砕に伴うAEを観測した。

3.2 流体の圧入と AE 測定結果

流体の加圧は、直径 86mm の破碎孔の孔底の中心に直径 36mm、長さ 150mm のパイロット孔を掘削し、この区間の上部を Oリングとセメントで密閉し、室内実験と同様、シリンジポンプから吐出した CO₂ を加熱して圧入した。AE 測定には共振周波数 70kHz の AE センサーを用い、このセンサーを油圧式のマイクロジャッキで破碎孔方向の孔壁に押し付けて測定した。

図 7 に CO₂ の圧力、温度、後に示す震源決定された AE の発生率及び注入流量を示す。ポンプの制御トラブルによる中断を除き 1 分間当たり 50cc の一定流量で CO₂ の圧入を続けたところ、圧力が臨界点を越える 7.38MPa で急激に圧力が上昇をはじめた。この変化は図 3 に示した室内実験でも見られたが、CO₂ が気体状態から超臨界状態に変化し圧縮率が小さくなったためと思われる。圧力は 15.62MPa の最大圧を示したのち急激に低下し、AE の発生率もこれとともに急増しているため、この圧で岩盤に亀裂が生じたものと思われる。亀裂発生時には臨界温度の 31℃ を下回らないものの温度が 32.6℃ まで低下しており、室内実験と同様亀裂の発生により CO₂ が漏洩して断熱膨張したためと思われる。亀裂発生に伴う AE の発生が極めて多かつたためデータ収録能力が追いつかず、図 7 (b) の黒四角で示した時間に AE データの欠測が生じた。AE 発生率の最初の低下は、この欠測によるものである。

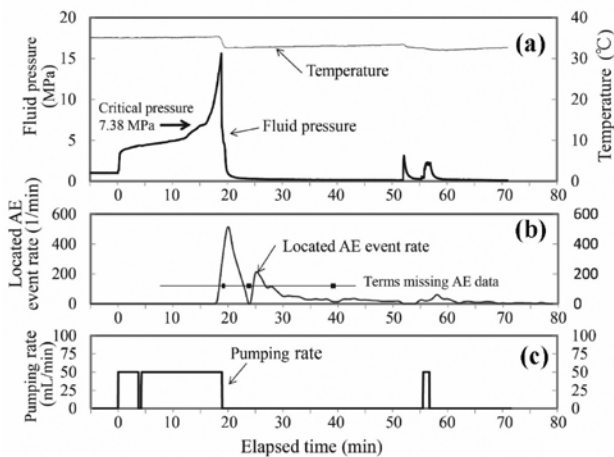


図 7 現場実験での測定結果⁴⁾

(a) CO₂ の注入圧力、温度 (b) 震源決定された AE の発生率
(c) CO₂ の注入流量

この実験で震源決定できた 1463 個の AE の震源分布の水平面 XY 及び 2 つの鉛直断面 YZ 及び XZ への投影図を図 8 に示す。水平面図の AE1 ~ AE4 は AE 観測孔の位置を、鉛直断面図の 2 本の点線は加圧区間を示す。震源決定精度は 50mm 程度であるが、AE 震源は破碎孔から AE1 孔と AE3 孔の方向に広がり、鉛直方向には加圧区間を中心にやや下方に大きく広がっていることがわかる。AE1 孔と AE3 孔では破碎に伴い CO₂ が孔内にたまった水の中からはこぼれ湧出するのが観察されており、震源分布はこの観察結果とよい一致を示している。

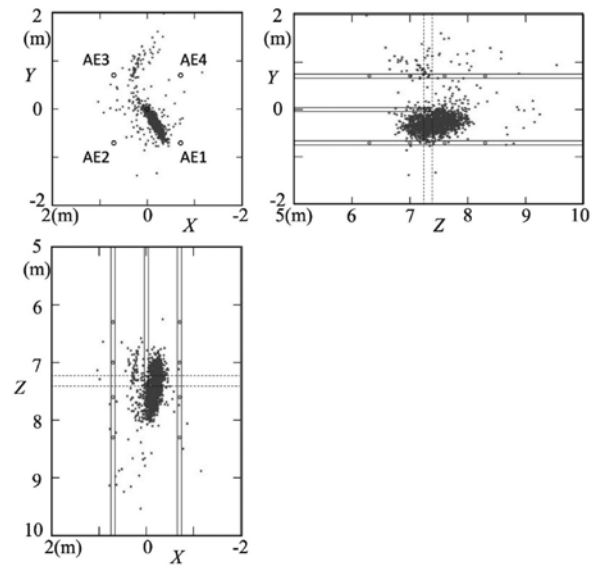


図 8 AE の震源分布の水平面 XY 及び 2 つの鉛直断面 YZ 及び XZ への投影図⁴⁾

水平面図の AE1 ~ AE4 は AE 観測孔の位置を、鉛直断面図の 2 本の点線は加圧区間を示す。AE 観測孔内の■印は、AE センサーの位置を示す。

3.3 考察

図 9 は、亀裂発生 (BD : Breakdown) から 75 秒まで (図 8 で 18 分 55 秒から 20 分 10 秒) と、亀裂発生から 1500 秒の間 (18 分 55 秒から 43 分 55 秒) の AE 震源分布の水平面 XY への投影図を比較したものである。図 9 (a) をみると、亀裂発生から 75 秒までは破碎孔から AE1 と AE3 の方向 (A 方向と呼ぶ) に AE の震源が分布するが、図 9 (b) に見られるように、75 秒以降破碎孔から 0.7m 程度離れた位置で、A 方向にほぼ直交する B 方向に震源が分布していることがわかる。図 7 で圧力を見ると、亀裂発生から 1500 秒後に対応する 43 分 55 秒まで注入圧はほとんど 0 であることから、B 方向に広がった AE 震源は新たな亀裂の発生ではなく、既存亀裂に CO₂ が侵入して発生したものと推測される。以上のことから、超臨界状態の CO₂ で岩盤が破碎され、亀裂が破碎孔から AE1 及び AE3 の方向 (A 方向) に進展するとともに、破碎後 75 秒経過してから圧力が低下して気体状態となった CO₂ が、A 方向とほぼ直交する B 方向の既存亀裂に侵入して AE を発生させたものと思われる。

既存亀裂への侵入がほぼ圧力 0 の状態で生じていることは、気体状態の CO₂ は既存亀裂に侵入しやすいことを示していると思われる。なお、この後機会を改めて同じ流量で CO₂ と水を圧入した実験では、CO₂ の方が水よりも広い範囲に AE の震源が分布する傾向がみられており⁷⁾、また破碎のメカニズムも CO₂ と水で異なる傾向もうかがえる。今後室内実験の結果とも比較しながら、さらにデータの解析を注意深く行っていきたいと考えている。

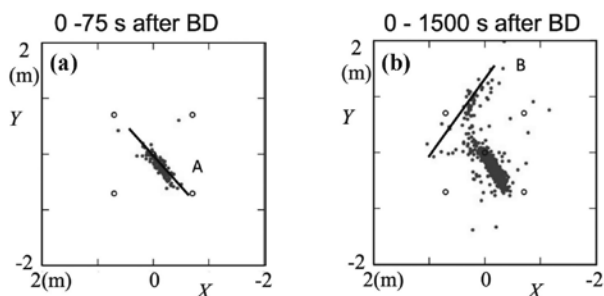


図9 既存亀裂の影響と思われるAE震源分布の経時的変化(水平面への投影図)⁴⁾

(a)亀裂発生(BD: Breakdown)から75秒まで(図7で18分55秒から20分10秒), (b)亀裂発生から1500秒の間(18分55秒から43分55秒)

4. まとめ

筆者らの研究グループは、一辺170mm角の立方体花崗岩を超臨界のCO₂、常温の液体状態のCO₂、常温の水及び水の約300倍の大きな粘度を有する油で加圧して破碎する実験を行い、CO₂のような粘度の小さい流体で岩盤を破碎すると水で破碎するより細かい亀裂が広い範囲に3次元的に広がり、シェールガスの生産や高温岩体発電に有利な亀裂が造成されることを明らかにした。また臨界温度の31℃を上回る高温の花崗岩に深さ約8mのボーリング孔を掘削し、超臨界CO₂で水圧破碎する小規模な現場実験を行った。その結果、CO₂は既存亀裂に侵入しやすいことを示唆する結果を得た。今後さらにデータの解析を行い、CO₂を利用した地球環境にやさしいエネルギー開発に寄与していきたいと考えている。

謝辞

本論文で紹介した研究は、日本科学振興会科学研究費補助金基盤研究(B)課題番号21360446及び同基盤研究(A)課題番号25249131並びに平成24年度公益信託ENEOS水素基金の助成を得て行った。ここに記して感謝の意を表す。

— 参考文献 —

- 1) Xie, H., Li, X., Fang, Z., Wang, Y., Li, Q., Shi, L., Bai, B., Wei, N. and Hou, Z.; Carbon geological utilization and storage in China, current status and perspectives, *Acta Geotechnica*, 9, 7-27 (2014)
- 2) 石田毅, 永谷侑也, 乾周平, Bennour, Z., 陳友晴, 陳渠, 中山芳樹; 超臨界二酸化炭素と水及び粘度の大きな油による水圧破碎実験, *Journal of MMIJ (資源・素材学会誌)*, 131, 4, 115-121 (2015)
- 3) Ishida, T., Chen, Y., Bennour, Z., Yamashita, H., Inui, S., Nagaya, Y., Naoi, M., Chen, Q., Nakayama, Y. and Nagano, Y.; Features of CO₂ fracturing deduced

from acoustic emission and microscopy in laboratory experiments, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 11, 8080-8098 (2016).

- 4) Ishida, T., Desaki, S., Yamashita, H., Inui, S., Naoi, M., Fujii, H. and Katayama, T.; Injection of supercritical carbon dioxide into granitic rock and its acoustic emission monitoring, *Procedia Engineering*, 191, 476-482 (2017) (Proc. of Eurock 2017, Ostrava, Czech Republic, 19-22 June, 2017) doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.206.
- 5) 石田毅; 岩盤破壊音の科学, 近未来社, 1999年, p213
- 6) Warpinski, N. R. et al.; Proc. of 2005 Annual Technical Conference and Exhibition, Soc. of Pet. Eng., Dallas, Tex., USA., SPE95568, (2005).
- 7) 岸本恭暢, 出崎秀一, 藤戸航, 石田毅, 直井誠, 鈴木健一郎, 藤井宏和, 片山辰雄; 超臨界二酸化炭素を用いた原位置岩盤小規模水圧破碎実験におけるAE震源メカニズム解析, 日本材料学会第66期学術講演会, paper No. 107, (2017)