

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 8 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560987

研究課題名(和文)ハイブリッドX線CT法によるマクロ-ミクロ流動・岩盤破壊評価法の高度化

研究課題名(英文)Development of the macro-micro fluid and fracture evaluation methods by hybrid X-ray CT method.

研究代表者

佐藤 晃 (Sato, Akira)

熊本大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号：40305008

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、産業用X線CTならびにマイクロフォーカスX線CTの2つのスペックの異なるX線CTスキャナーを適用し、岩石内部での流体の流動現象あるいは空隙構造を数センチメートルのマクロスケールから数マイクロメートルのミクロスケールで総合的に評価する方法を確立した。特に、超高压下での超臨界/液体状態にある二酸化炭素と空気の2相流について、空隙内部でのそれぞれの存在率とその形態を定量評価することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this study, we applied the different specs of X-ray CT scanners to the evaluation of the fluid flow and geometry of pore structures of the rock samples. We are operating industrial use of X-ray CT scanner and micro-focus X-ray scanners, and the synthetic method to evaluate fluid flow and structures from macro scale of several centimeters to micro scale of several micrometers. Especially, we have conducted the flow tests of supercritical/liquid state of CO₂ to the water saturated rock samples, and the state of CO₂ in the pores was clearly visualized and the replacement ratio, which represents how much pore spaces are replaced by CO₂, was successfully evaluated.

研究分野：総合工学

科研費の分科・細目：地球・資源システム工学

キーワード：X線CT 多孔質体 流体 2相流 二酸化炭素

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化にともない、その主原因の一つである二酸化炭素の総排出量の低減が求められている。様々な温暖化対策のうち、実現が容易な対策の一つとして原子力エネルギーの活用も重要視されているが、原子力発電で発生する高レベル放射性廃棄物処分には未だ解決すべき多くの問題があり、岩盤工学の立場からは天然バリアとしての岩盤中での放射性物質の物質移行問題などの評価が必要不可欠である。一方、現状として排出されるCO₂を分離(Capture)し、地中の帯水層に貯留(Storage)するCO₂地中貯留(CCS)も有望なCO₂削減方法として考えられている。

これらの計画はいずれも深度300m~700m程度の大深度岩盤を対象としており、その深度から10MPa~20MPaといった高封圧環境下での岩盤の力学的評価、流動特性、破壊特性の詳細な評価が必要である。また、CO₂地中貯留ではCO₂は液体あるいは超臨界状態であり、通常の地下水とは異なった環境下での岩盤の特性の評価が必要である。

2. 研究の目的

先に1.背景で示したとおり、放射性廃棄物の地層処分やCO₂地中貯留といった計画を安全に遂行するためには10MPaを超えるような高封圧環境下での水あるいはCO₂といった流体の流動現象ならびに対象岩盤の亀裂進展といった破壊現象の高精度評価法の確立が必要不可欠である。本研究では、マイクロフォーカスX線CTと産業用X線CTを組み合わせたハイブリッドX線CT法により、高圧特殊環境下における流動現象を、岩盤を構成する粒子レベルのミクロスケールから岩盤マスとしてのマクロスケールまでの高精度評価法を確立し、かつ多角的に地球資源システム工学のニーズに応じて研究を展開することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、マクロスケールおよびマイクロスケールでの岩石試料内部の可視化・評価を対象としている。そのため、X線CTスキャナーで可視化可能であり、かつ、異なる寸法の岩石試料に適した可視化システムの開発が必要となる。以下に、用いた岩石試料、システムの概要、および本研究で新たに開発した解析手法であるヒストグラム差分法について概要を示す。

(1) 岩石試料

本研究では比較的岩石の鉱物粒子の分布が均質であり、多孔質材料をして良く用いられているペレア砂岩を対象とした。また、この岩石は空隙スケール分布が比較的均質であり、流動現象の可視化には適した岩石試料である。

(2) マクロスケール可視化システム

岩石材料($2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)に比べ密度が小

さく、かつ、引張強度で700MPa~1GPaを保証する圧力容器を設計製作した。その概念図を図1に示す。本システムの中核となるのが岩石試料を高圧状態に保つ圧力容器部分であり、ここではX線の減衰を極力抑えるためにカーボンファイバー樹脂を用いて作成した。

(3) マクロスケール可視化システム

マクロスケールの可視化においても、同様にX線の減衰を極力抑さえつつ高圧状態を保持する必要がある。そこで本研究では、 μ フォーカスCTスキャナーの撮影に適したシステムを設計・製作した。その概念図を図2に示す。本システムは、その構造上、耐食アルミを用いて作成した。

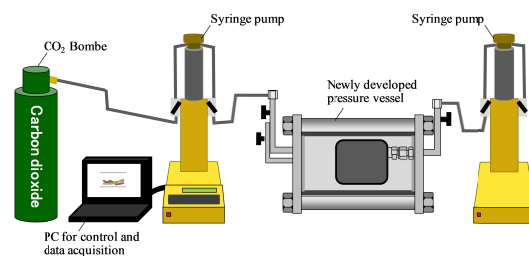


図1 マクロスケール可視化システム(産業用X線CTスキャナー用)

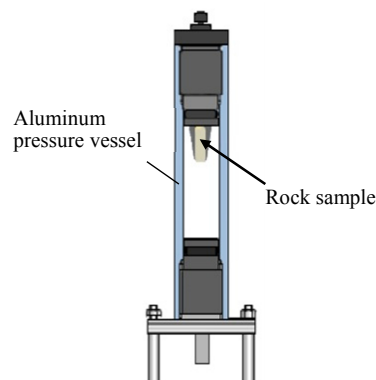


図2 マイクロスケール可視化システム(μ フォーカスCTスキャナー用)

(4) ヒストグラム差分法による閾値の判定方法の開発

密度変化が小さい現象の分析では、画像間の直接の差分データから必要な情報を抽出することが困難である。さらに、マイクロフォーカスX線CTスキャナーで取得可能な3次元画像データの場合、2次元画像データに比べてデータの量が膨大であり、これまでの画像間差分法では処理が煩雑になる。そこで、本研究では画像データを統計処理することによって閾値を決定するヒストグラム差分法を開発した。ここでのヒストグラム差分法とは、空隙構造は同じであるが、空隙内部がそれぞれ密度の異なる流体によりを満足されている状態で撮影を実施し、画像それぞれのCT値のヒストグラムの差を利用する方法である。この方法により、膨大な3次元画像データから空隙内部での密度の僅かな

変化量を，精度良くかつ効率よく抽出することに成功した。

例として，水飽和状態と乾燥状態の岩石試料を用いて撮影した画像データ間で，上述のヒストグラム差分法を適用し，用いたペレア砂岩の岩石試料の空隙率を評価した。その結果，得られた値は 15.54% となり，岩石試料の質量差で求めた空隙率(16.66%)とほぼ同じ値が得られた。この値は質量差で求めた空隙率と僅かに差があるが，これは岩石試料内部に設けた領域により変化すると考えられる。

4. 研究成果

(1) 岩石空隙構造の可視化と定量

実験に用いた試料の 3 次元空隙構造を，X 線 CT 画像データに対して Burn アルゴリズムを適用した解析手法により可視化・定量化した。その結果の例を図 3 に示す。このように，岩石試料内部での空隙の連結は一樣ではなく，連結が多い部分と少ない部分が堆積層と平行に層状に分布していくことが分かった。

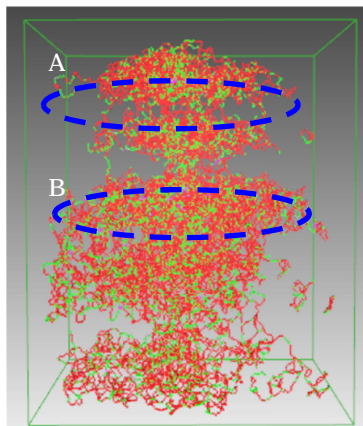


図 3 空隙の連結状態 (Medial axis) の可視化

(2) マクロスケール CO₂ 流動現象の可視化と置換率の評価

先に図 1 に示した可視化システムを用いて，水飽和ペレア砂岩試料に 8MPa の封圧条件の下，液体状態の CO₂ を圧入した結果について紹介する。ここでは，直径 50mm，長さ 50mm の円柱形試料に対して，円柱軸方向に CO₂ を圧入した。このプロセスを産業用 X 線 CT スキャナーにより撮影した。その結果の例を図 4 に示す。図中の点線部分の部分が，空隙内の水が CO₂ で入れ替わった領域である。液体状態の CO₂ と水の密度の差は $0.3 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 程度である。また，ペレア砂岩の空隙率は高々 20% 程度であるので，水 CO₂ の置換による試料全体の密度変化はごく僅かである。そこで，y 軸方向に CT 値をスタッキングし，その増分分布を求めたその結果を図 5 に示す。このように，流れ方向に垂直にデータをスタックすることで僅かな密度の増分を抽出することが出来る。この密度増分情報を元に，空隙体積内で水が CO₂ に置換された割合を示す置換率を評価した。その結果を

図 6 に示す。ここでは，3 つの圧入ケースの結果をまとめて示しているが，いずれの場合も置換率は 0.38 程度で収束している。つまり，巨視的には岩石試料の前空隙の約 38% の空間で置換が起きたことを示している。

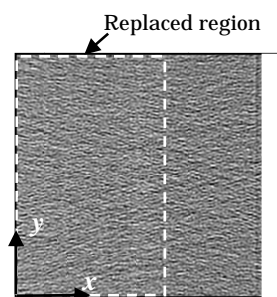


図 4 CO₂ 圧入時の X 線 CT 画像

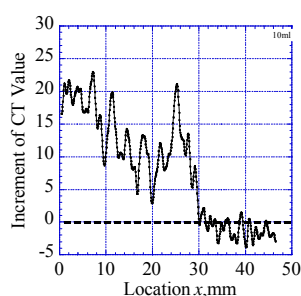


図 5 CO₂ 圧入時の CT 値の増分分布

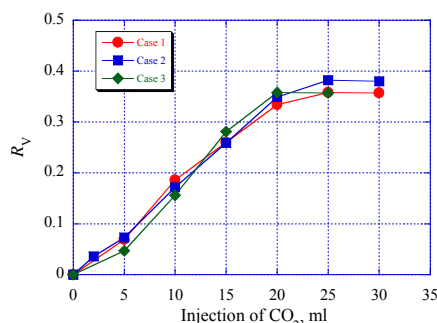


図 6 置換率と圧入量との関係

(3) ミクロスケール CO₂ 流動現象の可視化と置換率の評価

次に，図 2 に示した可視化システムを用いて，同じ水飽和ペレア砂岩試料に 8MPa の封圧条件の下，液体状態の CO₂ を圧入した結果について紹介する。ここでは，直径 10mm，長さ 50mm 円柱形試料に対して，円柱軸方向に CO₂ を圧入した。圧入プロセス時にマイクロフォーカス X 線 CT により撮影した画像の例を図 7 に示す。しかし，この画像そのものからは CO₂ の存在を確認することは困難である。

そこで，本研究で新たに開発したヒストグラム差分法を用い，水が CO₂ に置換された時の水と CO₂ の閾値を決定した。まず，画像データから得られた CT 値のヒストグラ

ムの例を図8～図10に示す。図8および図9に示すよう、水飽和時とCO₂圧入時との間でヒストグラムの違いを読み取ることは困難であるが、ヒストグラムの差分をとることにより置換により密度の増加および減少したボクセルの数を抽出することが可能である。図10中の領域AおよびBの度数の総和は等しくなる。この結果を用いて、本研究で用

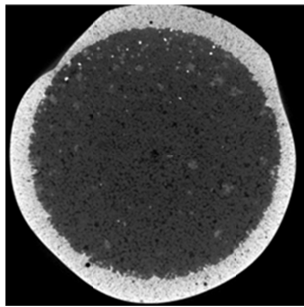


図7 マイクロフォーカスX線CT画像

図8 CO₂ 圧入時のCT値ヒストグラム

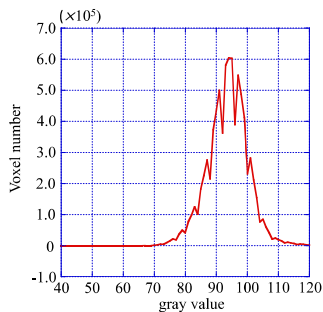


図9 水飽和時のCT値ヒストグラム

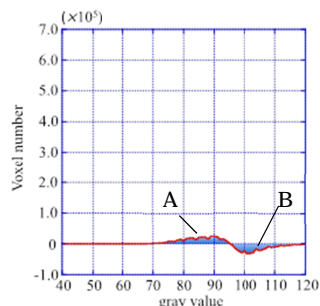
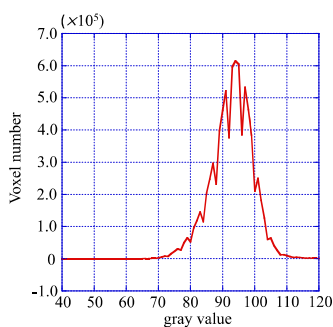


図10 CT値ヒストグラム差

いたペレア砂岩の微小領域での平均の置換率を評価した結果、観察する微小領域によりばらつきがあるものの、置換率は25%~35%の範囲で得られた。この値は、先に巨視的に得られた置換率の値とほぼ等しい値である。

次に、空隙内部において置換されたCO₂の存在形態について可視化を実施した。ここでは、ヒストグラム差分法により得られた閾値を用いて、水飽和およびCO₂圧入時の2値化画像を作成し、その差分をとった。このようにして得られた画像の例を図11に示す。例えば、図中の領域A、B、Cをみると白の領域の中に黒い領域が占めている。外側の白の領域が空隙の縁を表しており、内部の黒の領域が置換されたCO₂である。このように、CO₂はある場所の空隙内部の水を全て置換するわけではなく、中心部分に存在することが分かる。つまり、鉱物粒子の表面付近はまだ水が覆っており、CO₂が直接鉱物粒子に接しているわけではなく、水のトンネルの中に存在していることを示している。また、図中には白い空隙部分だけが存在し、内部に黒い部分、つまりCO₂が存在しないものもある。このような空隙は図中でも小さい空隙に多く見られる。つまり、CO₂は比較的大きな空隙を選択して流動したことが分かる。

図11はCO₂を8MPaの封圧下で圧入した結果であるが、同様に10MPaの封圧下で実験を行った結果、ほぼ同じような結果が得られている。さらに、液体CO₂ではなく無負荷状態で空気を圧入する実験を実施し、同じように空気の存在形態を可視化した。その結果、高封圧下での状態とほぼ同じであることが分かった。したがって、0~10MPaと封圧が大きく変わり、かつ、気相の空気と液相のCO₂の違いはあっても、空隙内部での水との存在形態はほぼ同じであるということが分かった。さらに、置換率についても、巨視的評価および微視的評価ともに同様の評価結果が得られており、気相・液相の如何を問わず、水で満たされた空隙内部に圧入された場合の置換プロセスおよび形態はほぼ同じである。高圧状態での実験は非常に難しいが、大気圧かであれば実施が非常に容易である。例えばCO₂地中貯留を考えた場合、地下から採取し

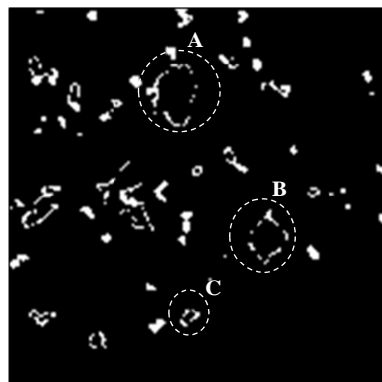


図11 空隙内のCO₂の存在形態

たサンプルを用いて、貯留量を概算する場合には、比較的簡易に大気圧下での評価が可能であることを示している。

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12件)

A. Sato, Ö. Aydan, An X-Ray CT Imaging of Water Absorption Process of Soft Rocks, Proceedings of UNSAT2014, 査読有, 2014, 掲載決定済み

Akira Sato, Analysis of the tracer diffusion phenomena through cracks in the porous media by means of X-ray CT, Materials Sciences and Applications, 査読有, Vol.4, No.8A, pp.18-31, 2013.

DOI: 10.4236/msa.2013.48A003

Akira Sato, Minami Kataoka and Yuzo Obara, Visualization of CO₂ Migration Process in Rock by Hybrid X-Ray CT Method, Tomography of Materials and Structures, Books of abstracts - Posters, 査読有, pp.265-268, 2013.

佐藤晃, 金山脩平, 小畑三千代, 豊海 彩, 石造文化財保護を目的とした Aquo - Siloxane 法による水分保持特性の分析, Journal of MMIJ, 査読有, Vol.129, No.7, pp.529-537, 2013.

Akira Sato, Minami Kataoka, HisafumiAsaue, Yuzo Obarad and Takashi Shiote, Analysis of CO₂ Migration and Residual Gas Trap Characteristic in Porous Rock under High-pressure Environment, Proceedings of ARMS7 -PRESENT AND FUTURE OF ROCK ENGINEERING-, 査読有, pp.965-971, 2012.

[学会発表](計23件)

Akira Sato, Introduction of X-Earth Center and the applications of X-ray CT to Rock Mechanics, International Workshop on Rock Mechanics in Chongqing University (MMIJ Special Session), Chongqing University, China (2013.11.12).

佐藤晃, X線CT法による多孔質内流動現象の可視化と分析, 資源・素材 2013(札幌), 北海道大学, (2013.09.3-5)

Akira Sato, Visualization and analysis of material advection in porous media by X-ray CT method, Yonsei-Kumamoto Univ. Geo-Workshop, Yonsei University, Korea (2013.08.27).

Akira Sato, Minami Kataoka and Yuzo Obara, Visualization of CO₂ Migration Process in Rock by Hybrid X-Ray CT Method, Tomography of Materials and Structures, Gent University, Belgium (2013.07.02).

Akira Sato, Minami Kataoka, HisafumiAsaue,

Yuzo Obarad and Takashi Shiote, Analysis of CO₂ Migration and Residual Gas Trap Characteristic in Porous Rock under High-pressure Environment, ARMS7 -PRESENT AND FUTURE OF ROCK ENGINEERING-, Seoul, Korea (2012.10.15-17).

[図書](計0件)

[産業財産権]
出願状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.civil.kumamoto-u.ac.jp/geox/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 晃 (SATO Akira)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 40305008

(3)連携研究者

棕木 俊文 (MUKUNOKI Toshifumi)

熊本大学・大学院自然科学研究科・准教授
研究者番号: 30423651