

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 30 年 5 月 18 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06641

研究課題名(和文)ハイブリッドX線CT法による再生可能地熱資源評価法の確立と高精度化

研究課題名(英文) Establishment of high accuracy evaluation method of renewable geothermal energy resource by hybrid X-ray CT method

研究代表者

佐藤 晃 (Sato, Akira)

熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授

研究者番号：40305008

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では水-蒸気2相流問題を有限体積法を用いて計算する基本的手法を確立した。本研究の特徴的な点は、地熱貯留層全体をシミュレートするのではなく、地熱貯留層を構成する基本要素である地熱貯留層要素モデルなる新たな要素モデルを提案した。さらに、本研究ではX線CTを用いた様々な2相流の可視化を実施し、特に密度差の分布があまり大きくない場合についてはヨウ化カリウム(KI)水溶液などの造影剤を活用するなど新たな試みを実施した。これまでは1画像内での相対的な密度分布の特定だけが可能であったが、条件を一定にすることで、画像データであるグレースケールと試料内部の密度との関係を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Firstly, fundamental procedure to simulate water-vapor two phase flow was established by means of finite volume method. The characteristic point of the study is that we introduced the geothermal element method and that the whole geothermal reservoir is simulated by the combination of the geothermal elements. Two phase state in the rock was also visualized by X-ray CT method. Especially, new calibration technique was established using KI solution as a contrast agent, and it becomes possible to evaluate the real density distribution, such as water-vapor condition in pores.

研究分野：岩盤工学

キーワード：地熱 再生可能エネルギー X線CT 有限体積法

## 1. 研究開始当初の背景

2011 年の東日本大震災および福島第 1 原発事故の発生以降、化石に燃料に依らず環境負荷の小さい再生可能エネルギーの利用が推進されている。「電気事業者による再生可能エネルギー電気の調達に関する特別措置法」でも触れられているとおり、地熱資源は再生可能エネルギーの中でも最も有望なエネルギー資源である。とりわけ、日本の地熱資源量は 2,300kW 程度と推計されており、世界でも第 3 位の資源量を誇っている。地熱資源開発では、熱エネルギーおよびそのエネルギーを輸送する媒体である熱水が存在する地熱貯留層内での、熱水・蒸気の流動現象を詳細に把握する必要がある。しかし、地熱貯留層を形成する地下岩盤は、それを構成する地質条件あるいはき裂 / 断層などの複雑な不均質性を有し、その結果、内部を移動する熱水・蒸気の流動現象の把握は非常に困難である。また、地熱資源開発による貯留層内圧力の減衰、生産量の減少など地熱貯留層そのものの性能変化とその変遷を評価する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、非破壊検査法の一つである X 線 CT 法を適用し、高温・高圧状態にある岩石内部の熱水・蒸気といった 2 相流状態にある流体の可視化と、毛管圧や熱水貯留量、流路となるき裂ネットワークなどの地熱貯留層を評価する上で必要な諸特性を評価する方法を確立することを目的とする。また、これらの計測結果を基にして、有限体積法を基にした熱水・蒸気相流解析モデルを構築し、効率的で持続可能な地熱資源開発法の確立を目指す。

## 3. 研究の方法

### 3・1 X 線透過型熱水流動循環評価システムの開発

本研究では、地熱貯留層の環境（封圧 30MPa 程度、温度 250℃）を再現しつつ、X 線 CT スキャナによる画像解析技術により岩石内部での熱水の流動現象の評価を目的としている。また、その有効性を検証するためのハイブリッド X 線 CT 法を適用するためには、これらの特殊環境を維持しつつ X 線の減衰を最小限に抑える低密度材料による試験評価システムを構築する必要がある。本研究では、上述のような高温・高封圧特殊環境を再現でき、特殊環境下での熱水流動循環試験が実施可能なシステムの開発をおこなった。特に、本研究の特徴でもあるハイブリッド X 線 CT 法の適用を前提とした評価システムを開発する。具体的には、岩石材料（ $2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ）と同程度の密度を持つ耐食性アルミニウムを用いた圧力容器を設計製作した（図 1）。さらに、X 線 CT スキャナ内の限られた空間、制限の中で使用可能な温度コントロールシステムの開発も併せて実施した。



図 1 X 線透過型熱水流動循環圧力容器

### 3・2 ハイブリッド CT 画像データによる空隙内熱水・蒸気 2 相分率評価法の確立

研究実施年度初期においては、地熱資源開発以前の地熱貯留層の状態を実験室レベルで再現し、飽和から不飽和状態に至る熱水・蒸気 2 相分率を CT 画像データから評価する方法を確立する。これまで申請者は画像間差分法やヒストグラム差分法といった微小な密度変化を抽出する画像処理データの基礎技術を有している。本研究では、高温高圧状態下での適用に加えて、画像データからの熱水・蒸気存在形態、2 相分率経時変化、毛管圧の変化などを評価する画像解析手法を確立する。

### 3・3 地熱貯留層要素モデルを用いた地熱貯留層シミュレーション

本研究では水・蒸気 2 相流問題を有限体積法を用いて計算する基本的手法を確立する。本研究の特徴的な点は、地熱貯留層全体をシミュレートするのではなく、地熱貯留層を構成する基本要素である地熱貯留層要素モデルなる新たな要素モデルを提案する。貯留層の計算はこの地熱貯留層要素モデルを用いて種々の基本パターンを計算し、それを組み合わせることによって貯留層全体をシミュレートする新たな手法を確立した。この方法により、大規模な計算は必要なく、既に知られている境界条件・初期条件の下に要素ごとに計算することによって計算時間を削減することが期待できる。

## 4. 研究成果

### 4・1 X 線 CT 法による岩石内気液 2 相状態の可視化と分析

ここでは、空隙率が約 10% の砂岩質岩石試料を用いて岩石空隙内での気液 2 相状態を X 線 CT を用いて可視化を実施した。研究ではまず、岩石試料内部の空隙分布を把握する必

要がある。研究代表者らは、産業用 X 線 CT 画像から試料内部の空隙率分布を評価する画像間差分法を確立している。この方法を用いて試料内部の空隙率を評価した例を図 2 に示す。図では、高空隙率領域を暖色系で、低空隙率領域を寒色系で示している。このように、一見均質な岩石試料でも空隙率は場所により大きく異なっていることがわかる。

次に、この岩石試料内部での気液 2 相状態の評価を試みた。ここでは、試料空隙内に存在する水の一部を蒸気化し、空隙内部で 2 相状態を再現し、これを  $\mu$ フォーカス X 線 CT スキャナで画像化する。この画像データを用いて、空隙内部での気液 2 相の比率を推定する。ここでは、研究者らが開発したヒストグラム差分法をさらに発展させ、気液 2 相にも対応できるように改良を施した。これにより、 $\mu$ フォーカス CT 画像により得られた膨大な 3 次元画像データを効率よく処理し、気相のみを抽出することができる。先に図 2 で示した岩石試料に対して、評価した変化した気相の割合を評価した結果を図 3 に示す。図の横軸は岩石試料の円柱軸方向の距離である。また縦軸は前空隙体積に対する気相の割合を示す。つまり、空隙全体が気相の場合には 100% の値を取るようになる。この図に示すように、岩石試料内部全域にわたってほぼ 50% ~ 60% の値を取っており、この試料の場合には空隙内の約半分の空隙体積は気相で占められていることを示す。このように、本研究では試料外部からは推定不可能であると考えられる内部の気液 2 相分布を CT 画像から評価することに成功した。

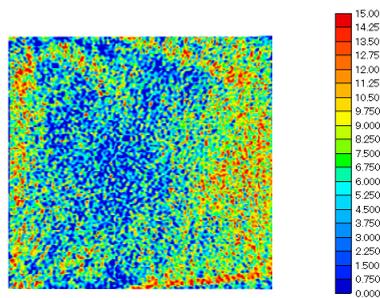


図 2 砂岩質岩石試料の空隙率分布

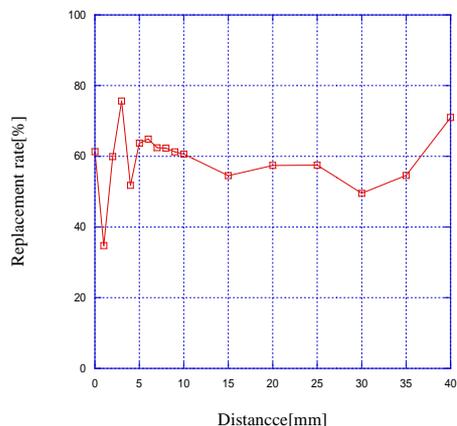


図 3 砂岩質岩石試料内部での気相分布

#### 4・2 有限体積法による地熱貯留層シミュレーション

地熱貯留層を構成する要素モデル、つまり地熱貯留層要素モデルを提案し、岩盤基質部を通して地下から熱が供給され、それが空隙やき裂内に存在する水を加熱する状態をシミュレートした。本研究では、地熱貯留層を代表する地熱貯留層要素モデルを作成し、流入温度や流入速度、熱源が与えるエネルギーなどの条件を変え、岩盤内部での熱交換による熱水 - 蒸気 2 相状態、温度分布および圧力分布などについて、有限体積法を基礎とした数値シミュレーションを実施した。

本研究で用いた地熱貯留層要素モデルを図 4 に示す。図中の黄色四角角部分が岩石気質部を示しており、その間が空隙である。熱はこの岩石気質部より流体に伝えられるものとする。本研究では基本的にこの要素モデルに対して種々の地熱パラメータを提供し、この要素モデルの解析結果を組み合わせることによって地熱貯留層全体を評価するものとする。

解析結果の例を図 5 に示す。これはこの要素モデルに流入速度 0.5m/s で 60 の水が流入する場合の解析結果で、暖色系が気相、寒色系が液相を示している。これは一例であるが、流入する水の温度や気液 2 相の割合を種々変化させて解析を実施し、これを組み合わせることで地熱貯留層を再現する。

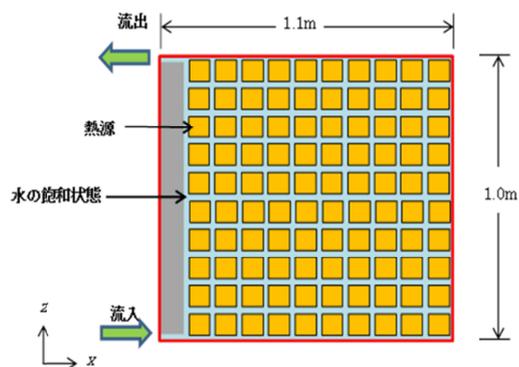


図 4 地熱貯留層要素モデル

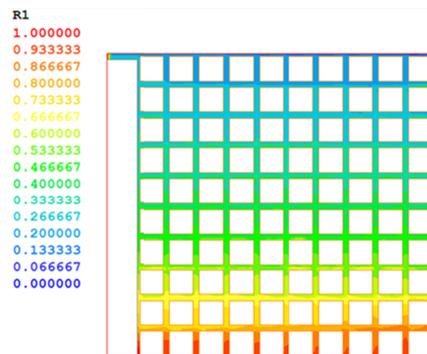


図 5 要素モデルを用いた気液 2 相分布解析

## 結果

要素モデルに対して与えられる熱量と気液 2 相の比率の変化を求めた結果が図 6 である。縦軸  $R_l$  は液相の比率を表しており、 $1-R_l$  が気相の比率となる。横軸の解析回数は要素の個数、すなわち距離を意味する。この結果より、地下から与えられる熱量により地熱貯留層での気液 2 相の比率が推定できる。地熱開発においては蒸気の割合が多いほど発電効率は上がる。従って、現場で井戸を掘削した際の気液 2 相の比率がわかれば、気相が最も大きくなる位置を推定することができ、最適な生産井の位置を決定できることになる。

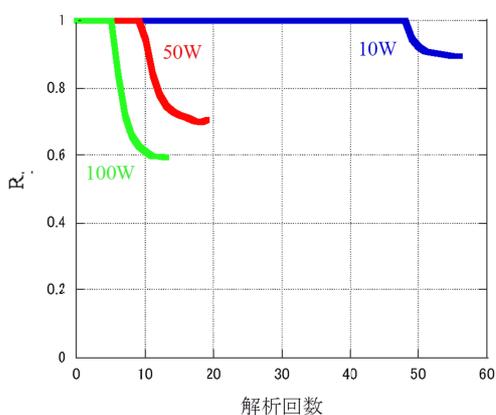


図 6 熱量と気液 2 相の割合の変化

### 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 9 件)

Akira Sato and Yuzo Obara, Analysis of pore structure and water permeation property of a shale rock by means of X-ray CT, *Procedia Engineering* Vol.191, pp.666-673 (2017).  
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.230>

Akira Sato, Minami Egashira and Michiyo Obata, Evaluation of Preservation Effect by Aquo-Siloxane Method towards Water Permeation and Material Diffusion into Porous Rocks, *Materials Science and Applications*, Vol.8 No.6, pp.419-435 (2017).  
DOI: 10.4236/msa.2017.86029

A.Sato, S.Nishizono and H.Tang, Analysis of Oil-Water Two Phase Flow in Porous Rocks by means of X-Ray CT Method, *Proceedings of 2017 Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics (YSRM 2017) & 2017 International Conference on New Development in Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (NDRMGE 2017)*, pp.75-78 (2017).

A. Sato, K. Ikeda, T. Yatsunami, K. Tsuda, T. Fukumitsu, K. Habu, Prevention Effect of Material Flow in the Porous Rocks by Aquo-Siloxane Method, *Rock Mechanics & Rock Engineering: From the Past to the Future*, Vol.2, pp.847-852 (2016).

佐藤晃, 八浪宰, 池田倅一, 津田和弘, 福満崇弘, 羽生健吾,  $\mu$ フォーカス CT による多孔質空隙スケールでの拡散現象の分析, *材料*, Vol.65, No.4, pp.451-456 (2016).  
<http://doi.org/10.2472/jsms.65.451>

Takahiro Fukumitsu and Akira Sato, Development of Fundamental Heat Exchange Simulation Method Aimed for Geothermal Reservoir Analysis, *Proceedings of the 4th World Conference on Applied Sciences, Engineering & Technology*, (2015).

佐藤 晃, 椋木俊文, X線CTの基礎知識と岩盤工学への適用, *Journal of MMIJ (ISSN: 1881-6118)*, Vol.131, No.6, pp.277-284 (2015).  
<http://doi.org/10.2473/journalofmmij.131.277>

Akira SATO and Koichi IKEDA, Visualization of diffusion phenomena in the porous media by means of X-ray CT, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.52, No.10, pp.1448-1456 (2015).  
DOI: 10.1139/cgj-2014-0451. (2 June 2015)  
<http://www.nrcresearchpress.com/doi/abs/10.1139/cgj-2014-0451#.VdJp4fntlBd>

A.Sato and Y. Obara, Analysis of Ore Blockages in The Vertical Shaft at Open Pit Mine by Discrete Element Method, *ISRM CONGRESS 2015 -Innovations in Applied and Theoretical Rock Mechanics-*, Paper No.146 (2015).

〔学会発表〕(計 18 件)

A.Sato, S.Nishizono and H.Tang, Analysis of Oil-Water Two Phase Flow in Porous Rocks by means of X-Ray CT Method, 2017 Young Scholars' Symposium on Rock Mechanics (YSRM 2017) & 2017 International Conference on New Development in Rock Mechanics and Geotechnical Engineering (NDRMGE 2017), (2017.05.10-12, 濟州島, 韓国)

西園隼太朗, 佐藤 晃, 白亜紀層釧路頁岩の広域的な透水性・空隙構造の評価, 平成 29 年度資源・素材学会九州支部「若手研究者および技術者の研究発表会」(2017.06.02, 熊本大学, 熊本市)

唐皓文, 佐藤晃, 3次元DEMによる立坑鉛直部における閉塞解析, 平成 29 年度資源・素材学会九州支部「若手研究者および技術者

の研究発表会」(2017.06.02, 熊本大学, 熊本市)

松本裕之(釧路コールマイン), ○内田景己(釧路コールマイン), 佐藤努(北海道大学), 佐藤晃(熊本大学), 鮎沢潤(福岡大学) 末永弘(電力中央研究所), 釧路地方の岩層メタンガスについて(5), 平成29年度資源・素材学会北海道支部春季講演会,(2017.06.16, 北海道大学, 札幌市)

Akira Sato and Yuzo Obara, Analysis of pore structure and water permeation property of a shale rock by means of X-ray CT ,EUROCK2017 (2017.06.19~22 ,オストラバ ,チェコ共和国) ほか12件

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

〔その他〕

Researchmap :

<http://researchmap.jp/read0056234>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

佐藤 晃 (SATO Akira)

熊本大学・先端科学研究部・准教授

研究者番号：40305008

### (2)研究分担者

なし

研究者番号：

### (3)連携研究者

椋木俊文 (MUKUNOKI Toshifumi)

熊本大学・先端科学研究部・准教授

研究者番号：30423651

### (4)研究協力者

なし( )