

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K15494

研究課題名（和文）貯留層の高精度評価に向けた高精度粘性・透水係数同時測定システムの開発

研究課題名（英文）Development of simultaneous measurement system of viscosity and permeability coefficient for highly accurate evaluation of reservoir

研究代表者

村本 智也（Muramoto, Tomoya）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・研究員

研究者番号：60828284

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では重錘形圧力天びんを用い、細管内を流れる流体の高精度粘性率測定システムの構築を行った。bis(2-ethylhexyl) sebacateを対象として高温高圧下で実験を行った結果、先行研究と整合性のある測定値が得られた。また、本研究で組み上げた装置の健全性が確認された（Muramoto et al., 2020）。本研究で組み上げた装置を拡張することで、粘性率測定から岩石等の透水係数の測定をシームレスに可能な装置が実現することが期待される。

研究成果の学術的意義や社会的意義

貯留層をはじめとした多孔質媒体の特徴の一つに、その内部にある複雑な幾何形状をもつ空隙を経路として流体を通過させることができるという点がある。つまり、多孔質媒質は水理学的性質（浸透性と貯留性）を有している。その代表例が岩石である。近年、国策の一環で地熱発電におけるエネルギー回収に関する問題に取り組む際、また、高レベル放射性廃棄物地層処分システムの長期安全性を評価する上で、対象となる岩盤の透水・物質輸送特性を詳細に把握する必要性が強調されるようになった。本研究で構築した装置を用いて地殻を流れる流体を模したサンプルの粘性率を測定することにより、岩盤の物質輸送特性の詳細が明らかになることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we constructed a high-precision viscosity measurement system for fluids flowing in capillary tubes using a dead-weight pressure balance. bis(2-ethylhexyl) sebacate was measured in experiments under high temperature and high pressure, and the measured values were consistent with those of previous studies. In addition, the integrity of the apparatus assembled in this study was confirmed (Muramoto et al., 2020, Measurement Science and Technology). It is expected that the apparatus assembled in this study can be expanded to realize a device that can seamlessly measure the hydraulic conductivity of rocks and other materials from viscosity measurements.

研究分野：流体工学

キーワード：固液二相 粘性率 多孔質媒質 流動学 地層

1. 研究開始当初の背景

貯留層をはじめとした多孔質媒体の特徴の一つに、その内部にある複雑な幾何形状をもつ空隙を経路として流体を通過させることができるという点がある。つまり、多孔質媒体は水理学的性質(浸透性と貯留性)を有している。その代表例が岩石である。近年、国策の一環で地熱発電におけるエネルギー回収に関する問題に取り組む際、また、高レベル放射性廃棄物地層処分システムの長期安定性を評価する上で、対象となる岩盤の透水・物質輸送特性を詳細に把握する必要性が強調されるようになった。また、産業界からの大きな要請として、石油開発業界からのものが挙げられる。これは、高圧下における流体の粘性と岩石の透水係数が、増進回収法(Enhanced oil recovery; EOR)による原油やガスの産出量の計算に用いられる為である。EORとは、油層内にある貯留岩の中の小さな孔に残っている原油に対して、熱や炭酸ガスや水など他のエネルギー源を使い、物理的、化学的に性状を変化させて回収する手法の総称である。本研究では流体を圧入することによって原油を押し出す「水攻法」と「ガス攻法」を想定している。このような要請を受けて、学術的な目的においても、商業的な目的においても、高圧下における様々な流体の粘性測定が盛んに行われるようになり、それに伴った高精度な測定技術の開発の機運が高まっている。その一方で、透水係数の高精度な測定に関する計量学的視点での技術開発については今までに行われてきていない。また、一般的に用いられているDarcyの法則の厳密性に関する計量学的な検討は行われてきておらず、粘性係数と透水係数の相補的な関係を示す高精度な実測値は数少ない。それに起因して、高圧下における岩石中を流れる原油等の流体の流動状態並び遷移挙動には不明な点が多々あり、EORを想定した貯留層の評価の不確かさは非常に大きい。これに対し我々は、当センターの保有する高精度粘度測定技術の知見(Fujita et al., 2009, Metrologia)と高精度液体高圧力発生技術(Kajikawa et al., 2015, Metrologia)を組み合わせることで、より高精度な地層の透水・物質輸送特性及び原油や天然ガス等の産出量の評価を可能とする実験系が構築できるのではないかと着想した。

高温高圧下における透水係数に関する研究に関しては、国内外を問わず数多くの研究者が存在する一方で、同環境下(一連のプロセス)で粘性率と透水係数の同時測定を試みる例は本研究が初めてである。また、不確かさ評価を含めた、計量学的な観点での透水係数の高精度測定並びにSI単位系にトレーサブルな形での測定は申請者の知る限りでは世界初の試みである。本研究で開発した実験系により、SI単位系にトレーサブルな形で透水係数を求めることが可能となり、信頼性が担保されるような形で地層の透水・物質輸送特性及びEnhanced oil recoveryによる原油や天然ガス等の生産量の評価が可能になると期待される。

2. 研究の目的

本研究は申請者の所属する研究部門の擁する高精度粘性率測定技術と高精度液体高圧力発生技術を応用し、粘性率と透水係数の相補的な関係を利用した、貯留層の高精度評価を想定した高精

度高压粘性率・透水係数同時測定システムを開発することを目的としている。

3 . 研究の方法

2020年度から2021年度にかけては2019年度までの進捗に基づき、細管内を流れる流体の高精度粘性率測定システムの構築を行った。当初の予定通り、圧力発生器としては国家標準器でもある重錘形圧力天びんを用いた。重錘形圧力天びんは、ピストンシリンダの有効断面積並びに底面に鉛直下向きの力をかけることによって圧力を発生させる装置である。2021年度はシステム全体の調整を行い、センシングするパラメータの繰り返し性を確認した。また、レーザー式変位センサを導入したことによって流速のセンシングを精緻化することに制移行した。2022年度は高温高压下で粘性率を測定する必要のある液体のニーズについての調査を行った。この際、民間企業の技術者と密に連絡を取り合った。

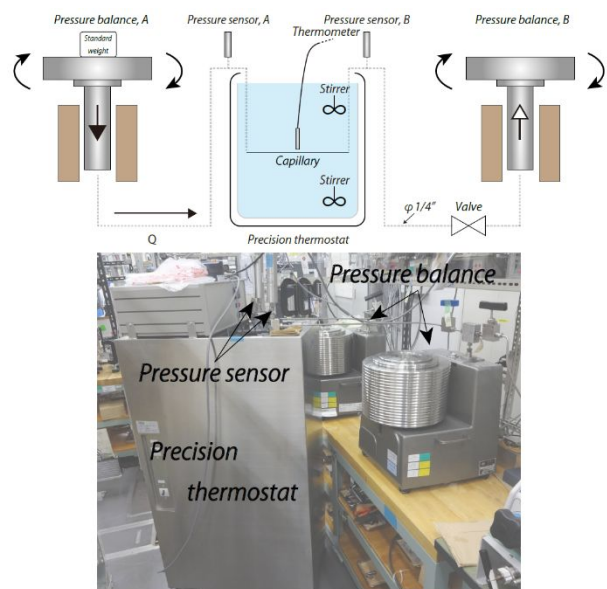
4 . 研究成果

開発したシステムの大まかな構成を図1に示す。重錘形圧力天びんを2台、流路の両端に接続し、その間に細管と圧力センサーを接続している。流体の粘性率の測定を行う際には周辺温度の安定性が非常に重要である為、細管の周辺では液体恒温槽で一定の温度を保っている。片側の重錘形圧力天びんに校正済みの微小分銅を加除することで安定した差圧を発生させ液体を圧送するシステムを構築した。

本研究で対象とする高压粘性率は重錘形圧力天びんの挙動と細管の両端に接続した

圧力センサーで得られた値から計算することができる(下記の式)。図2に測定中の重錘形圧力天びんと圧力センサーの挙動を示す。測定手順は図中の(1)~(3)の三段階に分けられる。以下にその概要を示す。(1)クロスフロート法を用いて平衡状態を作り、2台の重錘形圧力天びんのピストンの自由降下速度(v_0)を確認する。(2)ピストン位置を調節し、微小分銅の加除により差圧(ΔP)を発生させる。(3)差圧が発生したことによって流れが生じ、それに対応してピストンの降下速度が変化する($v_0 \rightarrow v_f$)。 v_0 と v_f は図2上図のような時系列中の或る時間窓に対して一次関数を当て嵌めることで計算する。 ΔP についても v_0 と v_f を計算した時間窓と同じ時間窓で計算を行う。つまり、(1)~(3)にかけての2本の圧力センサーの相対的な変化量を図2下図のような時系列から計算する。このような形で計算された物理量から下に示す原理式により最終的に求めたいサンプルの粘性率(μ)が求まる。

図1 : 装置の概観 (Muramoto et al., 2020, Measurement Science and Technology)

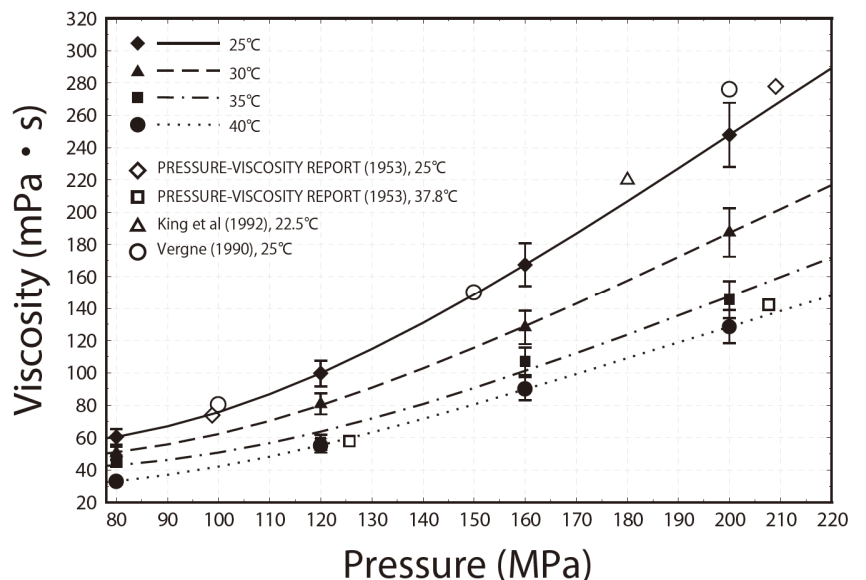
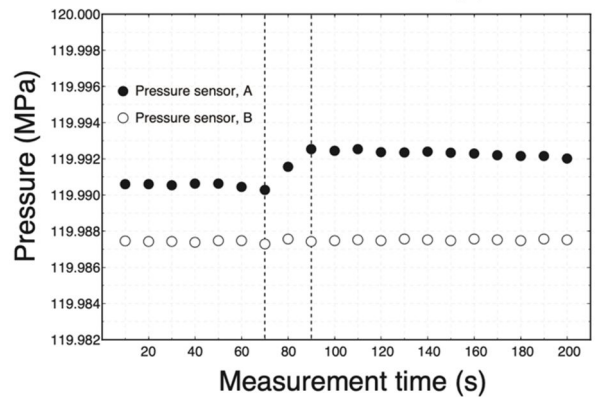
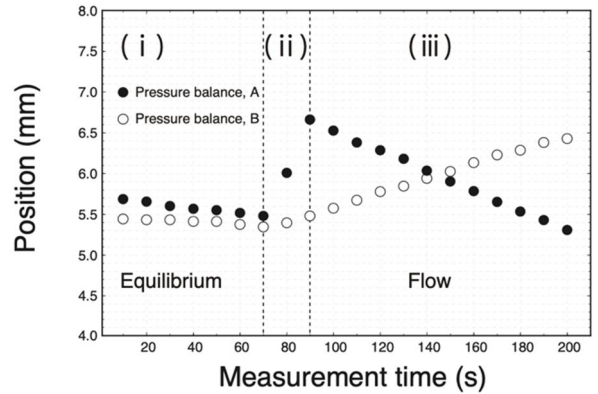
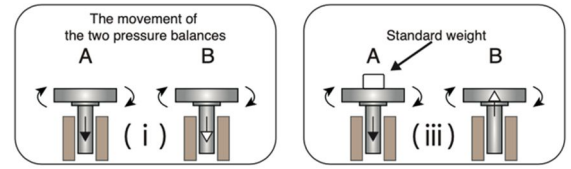


$$\mu = C \frac{\Delta P}{v_f - v_0}, \quad (C \dots \text{装置定数})$$

図 2 : 平衡状態から流れ発生までの各種時系列 (Muramoto et al., 2020, Measurement Science and Technology)

本研究では演繹的に導いた原理式が成立することを確認した後、サンプルの粘性率の計算を行なった (Muramoto et al., 2020, Measurement Science and Technology)。重錘形圧力天びんの圧力伝達媒体として特性がよく知られている圧力伝達媒体 (bis(2-ethylhexyl) sebacate) をサンプルとして用いて得られた結果を図 3 に示す。これより、本研究で得られた結果が既報の結果と良く整合していることが分かる。特に 150 MPa 以下の圧力レンジでは文献値との整合性が非常に良いという結果が得られている。また、独自に設計した液体恒温槽がシステム中で上手く機能し、圧力依存性のみならず温度依存性についても既報の結果と良く整合した。本研究で組み上げた装置を拡張することで、粘性率測定から岩石等の透水係数の測定をシームレスに可能な装置が実現することが期待される。

図 3 : 最終的に求まった bis(2-ethylhexyl) sebacate の粘性率 (Muramoto et al., 2020, Measurement Science and Technology)



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 1件）

1. 著者名 村本 智也	4. 巻 61
2. 論文標題 高圧流体の粘性率計測技術に関する調査研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測と制御	6. 最初と最後の頁 162 ~ 169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11499/sicejl.61.162	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 Tomoya Muramoto, Hiroaki Kajikawa, Hideaki Iizumi, Kazunori Ide and Yoshitaka Fujita	4. 巻 31
2. 論文標題 Design of a high-pressure viscosity-measurement system using two pressure balances	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Measurement Science and Technology	6. 最初と最後の頁 115302
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6501/ab9cdf	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 村本智也	4. 巻 43
2. 論文標題 高圧流体の粘性測定 - ニーズ・測定原理・最新の研究開発 -	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Petrotech	6. 最初と最後の頁 93-98
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Muramoto Tomoya, Ito Yoshihiro, Miyakawa Ayumu and Furuichi Noriyuki	4. 巻 50
2. 論文標題 Strain and Stress Accumulation in Viscoelastic Splay Fault and Subducting Oceanic Crust	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Geophysical Research Letters	6. 最初と最後の頁 e2023GL103496
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1029/2023GL103496	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 村本智也、伊藤喜宏、古市紀之
2. 発表標題 Viscoelastic behavior of solid-liquid two-phase under high pressure and high temperature
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2022年大会（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村本智也
2. 発表標題 Development of simultaneous measurement system of viscosity and permeability for highly accurate evaluation of groundwater under high pressure and high temperature condition
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Muramoto Tomoya, Fujita Yoshitaka, Kajikawa Hiroaki, Iizumi Hideaki, Ide Kazunori
2. 発表標題 In-situ high-pressure viscosity measurement of dioctyl sebacate using two pressure balances
3. 学会等名 Asia Pacific Measurement Forum on Mechanical Quantities, 2019（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村本智也、藤田佳孝、梶川宏明、飯泉英昭、井出一徳
2. 発表標題 貯留層の高精度評価に向けた高精度粘性・透水係数同時測定システムの開発
3. 学会等名 第49回石油・石油化学討論会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村本智也, 藤田佳孝, 梶川宏明, 飯泉英昭, 井出一徳
2. 発表標題 2台の重錘形圧力天びんを応用した高圧流体の流動特性評価システム
3. 学会等名 応用物理学会秋季学術講演会 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村本智也, 藤田佳孝, 梶川宏明, 飯泉英昭, 井出一徳
2. 発表標題 地殻流体の流動特性の高精度評価に向けた粘性・透水係数同時測定システムの開発
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合2019年大会
4. 発表年 2019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

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