

令和元年6月24日現在

機関番号：82121

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2018

課題番号：26289349

研究課題名（和文）中性子回折を用いた一軸圧縮および封圧下における岩石材料の応力ひずみ測定

研究課題名（英文）Stress-strain measurements in rock under uni-axial compression and confining pressure using neutron diffraction technique

研究代表者

阿部 淳（Abe, Jun）

一般財団法人総合科学研究機構（総合科学研究センター（総合科学研究室）及び中性子科・中性子科学センター・研究員

研究者番号：70513604

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 8,300,000円

研究成果の概要（和文）：放射性廃棄物の地層処分のような地下環境空間を工学的に利用するためには、地下岩盤を形成する岩石材料の力学的特性を理解する必要がある。そこで、岩石材料の一軸圧縮試験を行いながら、中性子回折法を用いたひずみ計測を行い、岩石材料にひずみが蓄積するメカニズムを解析した。さらには、地下環境におけるより複雑な応力状態を模擬しながら、中性子回折法を用いた測定が行えるように、中性子実験用封圧三軸圧縮装置を設計、製作した。新たに製作した中性子実験用封圧三軸圧縮装置のコミッショニングを行い、封圧三軸圧縮下における岩石材料のひずみ解析が中性子回折法を用いて行えるようになった。ひずみ蓄積メカニズムを解析中である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地下環境の複雑な応力状態における岩石材料の力学的特性を理解するために、中性子実験用封圧三軸圧縮装置を開発した。岩石材料の封圧三軸圧縮試験をしながら中性子回折法を用いたひずみ測定を行うのは世界で初めての試みである。本実験システムを用いる事により、封圧三軸圧縮下における岩石材料の新たなひずみに関する知見が得られるようになると思われる。

研究成果の概要（英文）：In order to use underground environment as an engineering space (e.g. geological isolation of high-level nuclear waste), understanding of the mechanical properties of the rock material is essential. Strain measurements of rock material under uniaxial compression using neutron diffraction technique were performed, and the mechanism of strain accumulation in rock material was analyzed. In addition, triaxial compression apparatus for neutron experiments was designed and developed.

Commissioning and feasibility tests of the newly designed triaxial compression apparatus was performed, and strain measurements of rock materials using neutron diffraction under triaxial compression were also carried out. The strain accumulation mechanism is under analysis.

研究分野：岩石力学

キーワード：地殻工学 中性子回折 封圧三軸圧縮試験 一軸圧縮試験 岩石供試体

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我が国では、純国産自然エネルギーである地熱エネルギーの抽出や二酸化炭素の地下貯留、さらには高レベル放射性廃棄物の地層処分に関する技術開発に力が注がれ、地下深部岩盤の工学的利用が注目されている。このような地下環境空間の工学的利用のためには、岩石の力学的特性の理解が極めて重要である。これらに関する研究手段として、実験室での岩石材料の圧縮試験に基づく応力ひずみ解析が大変有効であるが、これまでは、ひずみゲージや伸び計などを用いたマクロスコピックな計測に限られていた。これに対し本研究応募者は、高い透過力を有する中性子線を用いて、原子レベルの変位量から応力ひずみ解析を行うミクロスコピックな手法を適用し、さらに、き裂や鉱物粒子の滑りとともに生じる AE 信号を同時に計測できるようにすることで、一軸圧縮下における岩石試料内部にひずみが蓄積するメカニズムを解析した。その結果、中性子実験データからは鉱物結晶内に蓄積する格子ひずみ量を解析でき、AE 信号解析からは鉱物粒子の滑りや微小破壊などの動的現象に関する情報を得られるようになり、岩石材料のマクロな変形には、鉱物結晶内に蓄積するひずみと鉱物粒子の破壊、滑りが関与していることが示唆された。

一軸圧縮下における岩石材料のひずみ測定を行ってきたが、地下環境におけるより複雑な応力状態における岩石材料の力学的特性を理解するためには、封圧三軸圧縮下での測定へ展開する必要があった。そこで本研究では、中性子実験用の封圧三軸圧縮装置を開発し、中性子回折法を用いて岩石材料のひずみ測定を行い、ひずみ蓄積メカニズムを解析することを目指した。

### 2. 研究の目的

地下深部における、より複雑な応力状態でのひずみ測定を中性子回折法を用いて行うために、封圧三軸圧縮装置を開発する。それにより、封圧三軸圧縮下における岩石材料にひずみが蓄積するメカニズムを解析する。

### 3. 研究の方法

中性子実験用の封圧三軸圧縮装置の仕様を検討し、実験セルを設計、製作した。そのために実験セルの形状、素材等、および圧力媒体が岩石材料の封圧三軸圧縮試験が可能であることはもちろんであるが、中性子実験にも適用可能であるものを選定した。

中性子実験用封圧三軸圧縮装置を製作した後は、本圧縮装置の立ち上げ、コミッショニング作業を行い、茨城県東海村に建設された J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の BL19 工学材料回折装置「匠」に本圧縮装置を持ち込み、岩石材料を圧縮しながら中性子回折実験を行い、ひずみ解析を行った。

### 4. 研究成果

中性子実験用封圧三軸圧縮装置を製作した。発生封圧は 50 MPa とし、封圧媒体にはフロリナート (FC-770) を採用した。本圧力媒体は、水素原子を

含まない液体である。中性子実験において、水素原子を含む物質に中性子が照射されると、水素原子の強い非干渉性散乱により測定される中性子回折パターンのバックグラウンドが非常に高くなり、試料からの回折ピークがバックグラウンドにうもれることがある。また、封圧容器の素材に関しては、10mm 程度の厚さでも中性子が十分透過することをあらかじめ計算および中性子実験により確認し、鉄の合金 (SCM440) を封圧容器素材とした。中性子実験用封圧三軸圧縮装置の装置図と封圧容器内に岩石試料をセットした写真を Fig. 1. に示す。

2018 年上期の J-PARC マシントイムに中性子実験用封圧三軸圧縮装置を BL19 に持ち込み、本装置に砂岩材料をセットし中性子実験を行った。まず、封圧容器およびフロリナートによる中性子回折ピーク強度がどれだけ減衰するかを検討し、つぎに砂岩材料に封圧を 50MPa まで印加しながら中性子回折実験を行い、ひずみ量を算出した。J-PARC MLF BL19 「匠」での実験の様子を Fig. 2 に示す。

本封圧装置を用いた中性子実験では、岩石試料に入射し散乱される中性子ビームは封圧容器

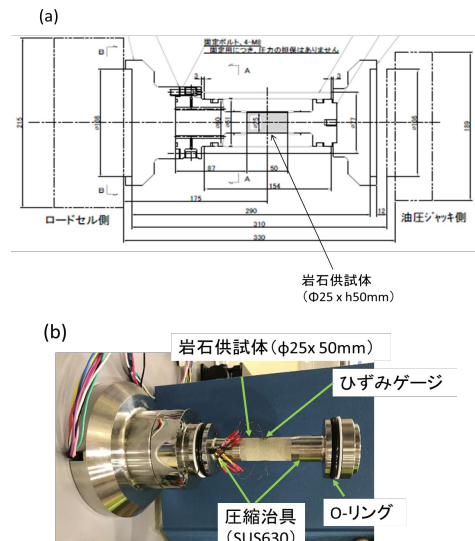
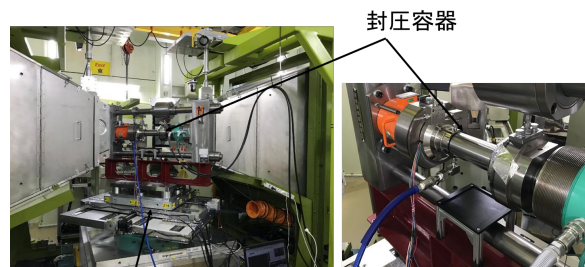


Fig. 1. 中性子実験用封圧三軸圧縮装置図(a)と封圧容器内に岩石試料をセットした様子(b)。



「匠」サンプルステージ  
Fig. 2. J-PARC BL19 「匠」での実験の様子。

材を約 23mm、圧媒体のフロリナートを約 51 mm 透過して検出される。中性子ビームがこれらの材料を透過する過程において、吸収・散乱の影響により中性子強度は減衰する。中性子回折ピーク強度の減衰量を検討した結果、封圧容器および圧媒体によって強度が 96.5%減衰した。このように封圧容器材および圧力媒体による中性子回折ピーク強度の減衰が激しかったことから、ひずみ解析可能な統計のデータを取得するのに数 10 分程度では測定時間が不十分であることがわかった。そこで、入射ビームスリットサイズを広げる、測定時間を長く、1 時間程度に設定するなどして、ひずみ解析可能な回折ピークが測定できるようにした。

砂岩材料にベレア砂岩を用いて、封圧を 50MPa まで印加させながら、中性子回折実験を行った。この時の測定では、岩石材料にはジャケット材は装着せずに、アンジャケットで封圧を印加している。また、岩石供試体には、ひずみゲージも貼付しバルクのひずみ量も同時に測定している。Fig. 3 には封圧容器にセットされたベレア砂岩の中性子回折パターンを示す。Fig. 3 に示すように、封圧容器にセットされた岩石材料からでもひずみ解析可能な中性子回折パターンが観測できた。Fig. 4 には中性子回折パターンの 3.3 付近に観測されている石英の 1011 回折ピーク位置の封圧変化を示す。石英の回折ピーク位置は、加圧にともない面間隔が小さくなる

方へシフトする結果となり、石英鉱物中に圧縮ひずみが蓄積していることがわかる。ピークシフト量から体積ひずみを算出したものを Fig. 5 に示す。この体積ひずみ測定結果を既往のアンジャケットでのひずみ測定結果<sup>1)</sup>と比較すると、本測定で得られた結果が同様のひずみ量となったことから、本研究で整備した封圧三軸圧縮装置を用いて中性子回折法によるひずみ測定が可能となったと言える。

2018 年下期の J-PARC マシンタイムでは、円柱形の岩石供試体にジャケットを巻き、10MPa の封圧を印加しながら、軸方向に圧縮応力を印加し、封圧三軸圧縮下における中性子回折法を用いたひずみ測定を行った。測定結果は現在解析中であり、ひずみ測定結果から、バルクのひずみ量と結晶格子中に蓄積するひずみ量の違いや、岩石材料のひずみメカニズムを解析する予定である。

1) R.M. Makhnenko, J.F. Labuz, Poromechanics V, pp.481-488 (2013)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 1 件)

J. Abe, K. Sekine, S. Harjo, T. Kawasaki and K. Aizawa, Effect of gauge volume on strain measurement in rock materials using time-of-flight neutron diffraction, Physica B: Condensed Matter, 査読有, Vol. 551, 283-286, 2018

[学会発表](計 10 件)

J. Abe, K. Sekine, S. Harjo, W. Gong and K. Aizawa, Simultaneous measurements of AE signal and neutron diffraction for analysis of strain in rock, 2nd Asia-Oceania Conference on Neutron Scattering, 2015

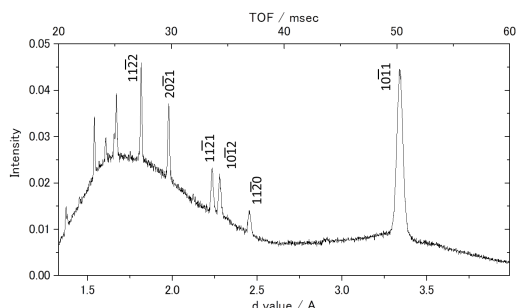


Fig. 3. 封圧容器内にセットされたベレア砂岩の中性子回折パターン。石英鉱物に由来する中性子回折ピークが観測されている。

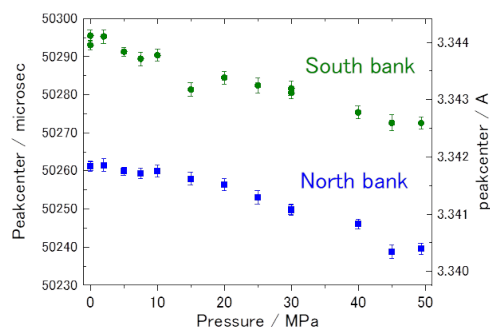


Fig. 4. ベレア砂岩の石英鉱物に由来する 1011 回折ピーク位置の封圧変化。岩石試料にはジャケットは装着せず、封圧を印加している。封圧が上昇するにともないピーク位置は面間隔が小さくなっている。

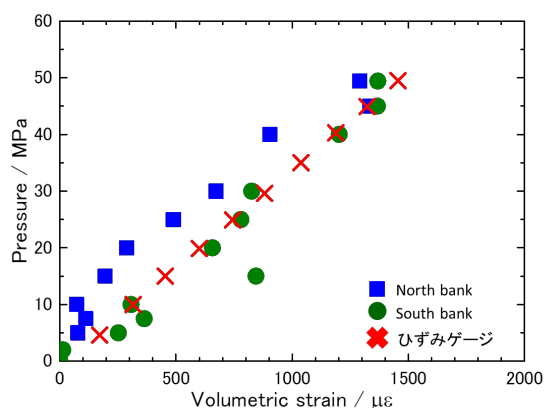


Fig. 5. 体積ひずみ算出結果。

materials

阿部淳、関根孝太郎、ステファヌスハルヨ、ゴンウー、相澤一也、中性子回折法と AE 計測を用いた岩石材料のひずみ測定、第 20 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス、2015

阿部淳、関根孝太郎、ステファヌスハルヨ、ゴンウー、相澤一也、Study of Rock deformation mechanism using Neutron diffraction technique and AE signal measurement、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015

阿部淳、中性子回折法と AE 信号測定を用いた岩石材料の変形機構の検討、2015 年度量子ビームサイエンスフェスタ、2016

J. Abe, K. Sekine, S. Harjo, T. Kawasaki and K. Aizawa, Investigation of rock deformation mechanism using Neutron diffraction technique and AE signal measurement、III AE 2016、2016

阿部淳、関根孝太郎、ハルヨステファヌス、川崎卓郎、相澤一也、中性子回折法と AE 信号測定を用いた一軸圧縮下の砂岩のひずみ測定、平成 28 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、2016

J. ABE, K. SEKINE, S. HARJO, T. KAWASAKI, K. AIZAWA, Study of deformation mechanism(s) of sandstones by parallel AE signal measurement and neutron diffraction technique、JpGU-AGU Joint Meeting2017、2017

J. Abe, K. Sekine, S. Harjo, T. Kawasaki and K. Aizawa, Effect of gauge volume on strain measurement in rock materials using time-of-flight neutron diffraction、ICNS2017、2017

阿部淳、関根孝太郎、ハルヨステファヌス、川崎卓郎、相澤一也、中性子回折法を用いた鉱物種毎のひずみ量解析、平成 29 年度資源・素材関係学協会合同秋季大会、2017

阿部淳、関根孝太郎、川崎卓郎、ステファヌスハルヨ、中性子を用いたひずみ測定のための封圧発生装置の開発、日本中性子科学会 第 18 回年会、2018

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号 (8 桁)：

(2)研究協力者  
研究協力者氏名：  
ローマ字氏名：

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。