

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610150

研究課題名(和文) 岩石の不安定挙動への分岐とその準備過程

研究課題名(英文) Bifurcation processes to shear-localization and unstable behavior of rock

研究代表者

高橋 美紀 (Takahashi, Miki)

独立行政法人産業技術総合研究所・活断層・火山研究部門・研究員

研究者番号：40470033

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、大地震へと発展するシステムの不安定挙動への準備は、まずシステムの中での剪断面の選択と変形の集中から始まると仮定し、歪軟化もしくは歪の加速過程における観測可能な現象を提言することにある。手法は板状の岩塩を模擬岩体とした平面歪試験をその場観察であり、装置の作成や適切な実験手順の開発から実施した。また、要素試験として岩塩-白雲母の紛体を初期物質に用い、その強度や速度依存性、ならびに速度に対応する定常的な組織の変遷について、回転せん断試験を実施した。

研究成果の概要(英文)：Here we assumed that processes to unstable behavior of rock, which induces huge earthquake, will be began from selection and localization of shear in rock system. Based on this hypothesis a goal of this study is to denote possible measureable phenomena we will have in nature. We planned and carried out two types of experiments; one is plane shear test on halite board, another is rotary shear test for halite powder. For the plane shear test, we started to construct new, observation-available machine for deformation on the halite board. For the rotary shear test, we determined deformation parameters of the halite-muscovite mixture using velocity step change tests. Those deformation parameters showed history dependences, which might be caused both by what matured structure developed in halite specimen and by localization.

研究分野：岩石力学

キーワード：歪集中 平面歪試験 回転せん断試験 摩擦構成則 分岐現象

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、観測技術の向上により大地震発生の前にその発生域周辺でスロー地震が観測されるなど、大地震への準備過程を示唆する結果が報告されている。一方地震発生シミュレーションにおいては、摩擦の速度・状態依存則 (RSF 則) とそのパラメータを用いた数値実験がなされており、岩石の変形実験はそのパラメータを提供するものとして活用されている。しかしながら、岩体をシステムととらえたとき、広範囲の破断へ至るまでの岩体の挙動は断層部分における摩擦挙動にのみ依存しているとは言い難い。現実の岩体には複数の断層が発達し、それぞれが応力を支えている。その中でシステムが広範囲を破断するようになるまでの準備過程は、システムの剪断面の選択と集中であろうと考える。また剪断面の選択はシステムにとっては分岐現象である。加えて、RSF 則はシステムが剪断の選択と集中を起こした後で有効になると考えた。よって、この仮定に基づき、試料全体を破断する最終破壊に至るまでの変形組織の変遷をその場観察が可能な平面歪試験を用いて実施し、試料が断層面を選択し、歪を集中させる過程において、観測可能な現象を明らかにすることで大地震の準備過程を明らかにする本研究課題に挑戦することとなった。

## 2. 研究の目的

(1) 岩体をシステムととらえたとき、大地震へと発展するシステムの不安定挙動 (歪軟化もしくは歪の加速) への準備は、まずシステムの中での剪断面の選択から始まる。不安定挙動が現れる前にシステムはすでに剪断を集中させる断層面を選択する分岐を通過している。剪断面の選択という分岐現象に着目し不安定挙動へ向けた準備過程における観測可能な現象を、高温・高圧下の岩石に類似の挙動を示す岩塩を用いて提示することが本課題の目的である。また、歪が集中し始めた後の岩体の挙動は断層面の物性にのみ支配されるようになるだろうことも考慮し、高温・高圧下での岩石の変形に関する要素試験として岩塩 - 白雲母混合物の速度依存性について回転式変形試験により明らかにする。

## 3. 研究の方法

本研究では以下の二つの実験手法をもちいて、岩塩の破断に至るまでの挙動と岩塩 - 白雲母混合物の剪断における要素試験を実施した。

### (1) 平面歪試験を用いた板状岩塩のクリープ試験

新規に平面歪試験装置を作成し板状岩塩の変形実験を行う。試料はアウトドア用品として市販されている岩塩プレートを用いた。およその岩塩プレートのサイズが

10cm\*8cm\*1cm の板状である。このサイズを基準に装置の設計を行う。設計にはフランス・グルノーブル大学 Viggani 教授に助言をいただいた。加圧には空気圧を用い、圧力調整弁を用いて加圧盤にかかる圧力を一定に保つ。空気圧の範囲は 1MPa まで増圧できる。試料の変形量は装置の左右に設置したレーザー変位計の平均値を用いる。カメラのインターバル撮影により試料の変形の様子を定期的に記録し変異の進行とともに活性化している剪断面の変遷を観察する。

### (2) 回転式剪断試験を用いた岩塩と白雲母混合物強度の速度依存性と剪断集中

変形の集中後、岩体の挙動は断層面の物性に依存すると考える。ここでも岩塩は高温・高圧下の岩石の性質を低温・低圧条件下でも模擬できる良いアナログ物質である。特に塩水に飽和した岩塩と白雲母の混合物の変形組織は高温・高圧下で形成される流動変形による組織 (マイロナイト) に似た構造を低速度条件下で示すことが知られている。一方高速度条件下では粒子間に孔隙を作りつつカタクラスティック、ランダムな変形組織を作ること知られており、速度条件次第で様々な変形組織を再現することができる。この混合物を用い、マイロナイト様組織を発達させた試料に高速への速度変化を急激に与える実験を行う。実験度組織観察を行い変形の集中や組織の変化を観察する。また速度の急変に伴う遷移挙動を解析し、RSF 則との比較を行う。実験はオランダ・ユトレヒト大学の回転式剪断試験機を用いる。(Niemeijer and Spiers, 2006, 2007)

なお、本実験を実施したオランダ・ユトレヒト大学は岩塩の変形に関する研究に長じており実験後の岩塩の観察方法等ノウハウを持っている。ユトレヒト大学で岩塩の取り扱いについて学ぶことも目的の一つである。

## 4. 研究成果

### (1) 平面歪試験を用いた板状岩塩のクリープ試験

平面歪試験装置の導入の後、まず実施したのは適切な実験条件を探ることである。肩あたりを防ぐために試料である岩塩プレートを整形する必要がある。岩塩プレートは端面並びに表面を平らにするため旋盤で表面を整形した。加圧盤の厚さに合わせ、岩塩プレートの厚さは 6mm 程度に薄くした。岩塩は水にぬれると強度を低下させ、また流動的な変形も起こせるので、仕上げに塩水で表面を磨いた。試料の整形の後、観察しやすい変形条件を探した。実験は応力一定のクリープ試験なので、所定の圧力に達した後圧力を保持し、変位を観測する。当初は 2~3kN ずつ荷重を増やしては歪の進行速度が減少するまで時間においては加圧を増やすという作業を行った。結果、11kN を越えると十分短時間で 1 次クリープから 3 次クリープまで観察でき

ることが分かった。荷重 11kN において 2 次クリープ時の定常歪速度は約  $1.4 \times 10^{-6}$ /sec であった。また、所定の荷重へすぐにあげるのではなく、5kN 程度の荷重で端面が加圧盤に均等に当たるよう前処理をしておくともよいことも分かった。11kN での荷重による 1 次から 3 次までのクリープの変遷に合わせ、変形組織は弾性的な歪と格子状の剪断面を作りながら組織を発達させる様子が観察できた。

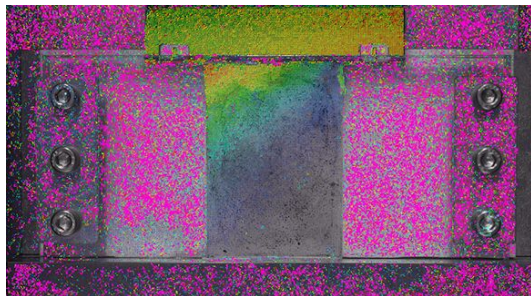


図 1 平面歪試験の様子と画像解析による歪場の検出結果。中央に板状岩塩試料を配置し、上方の加圧盤にて一定荷重をかけ、最終破断に至るまでの歪の加速を計測する。

適切な実験条件を得ることができたものの、最終的な剪断面の選択に至る前に試料板のベンディングが発生して実験が終了することが多く、ベンディングを防ぐことが課題として残っている。板状試料の強度はその縦横比に依存する感觸を得たので、試料の長さを長くとり、ベンディングを起こす前に変形集中が見えるよう、長さについても工夫をする必要がある。また、破壊による AE 信号など、大地震（実験においては最終破断）前の微小地震（実験においては微小領域の歪の進行や破壊）の分布との関係の比較などができるよう今後も実験を実施する予定である。

#### (2) 回転式剪断試験を用いた岩塩と白雲母混合物強度の速度依存性と剪断集中

塩水に飽和した 80% 岩塩 20% 白雲母混合物（合計 5g、初期圧密にして約 1mm の厚さに相当）に  $0.03 \mu\text{m}/\text{sec}$  から  $10 \mu\text{m}/\text{sec}$  までの様々な変位速度をあてそれぞれの速度に見合った変形組織を発達させたうえで、 $10 \mu\text{m}/\text{sec}$  以上（最大  $1 \text{cm}/\text{sec}$ ）の高速条件へジャンプさせる実験を実施した。また比較のため 1 ケタごとの速度ステップテストも実施し、強度や各パラメータに変形履歴依存性がないか、また変形組織との関係を検討した。

最大で 3.5 ケタの低速度から高速度へのジャンプをさせた場合も、1 桁ずつの急変を与え場合も、定常的な強度はほぼ変化はなかった。強度に関しては変形条件の履歴の影響は受けにくいと考えられる。一方、速度急変後の強度の遷移挙動が RSF 則に従うとし、それぞれパラメータを求めたところ、 $10 \mu\text{m}/\text{sec}$  を超える高速へのジャンプによって求められる RSF 則の直接効果を示すパラメータ  $a$  は、

それより低い速度へのジャンプに比べて非常に小さい値を取った。定常的な強度が速度の履歴に影響を受けにくい、 $a$  は  $10 \mu\text{m}/\text{sec}$  を超える変化を与えると履歴に依存し小さくなることが示された。ここでもう一つの RSF 則のパラメータである  $b$  は従属的な変数とみなせる。

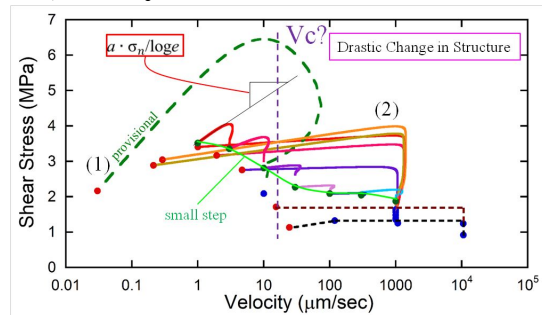


図 2 低速度から高速度へのステップテストを実施した時の強度 速度の軌跡。速度急変後の傾きがほぼ  $a$  に比例する。

変形組織は低速度ほどマイロナイト様を示し、 $5 \mu\text{m}/\text{sec}$  の速度にいたるまで段階的にマイロナイト組織の特徴がなくなり、複合面構造の剪断面に沿って孔隙が増加する傾向が見られ、 $10 \mu\text{m}/\text{sec}$  を超える速度においてはランダムな組織を示した。また低速度で形成されたマイロナイト組織は孔速度へのジャンプの後も残されており、回転側に変形の集中を示す細粒化したごく薄い  $10 \mu\text{m}$  ほどの剪断ゾーンが見られた。

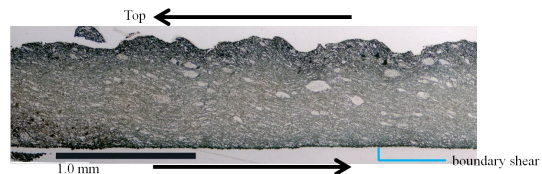


図 3 実験後の岩塩 - 白雲母混合物の研磨面写真。 $0.03 \mu\text{m}/\text{sec}$  でマイロナイト組織を作ってから  $10 \mu\text{m}/\text{sec}$  の高速度へ急変させた。矢印は剪断方向。下方が回転側である。回転側の端面は変形の集中により切られており、組織は残っていないが、その他は低速度で形成されるマイロナイト組織が発達している。

このことから非地震時の長期間において形成されるマイロナイト組織は高速度条件、つまり地震時の高速変形の発生もしくは伝播があっても構造の大部分は破壊されず、剪断の集中により大変位が賄われることがいえる。一方、最初から紛体の試料を用いるような場合、つまり低速度条件で発達するマイロナイト組織が未発達なまま高速変形条件へのジャンプを与えた場合、紛体はダイラタンシーを起こして試料全体が変形を賄うことになると考えられる。非地震時は流動変形により歪を消費しているような高温・高圧下の環境では剪断帯が紛体のままであるとは考えがたい。このような領域での地震発生機構を議論するなら、まずは十分に流動変形に

よる変形組織を発達させたうえで実験を行うべきであろう。また、その場合の変形の特徴は剪断の集中によるものであり、流動変形の痕跡と高速変形の痕跡がともに存在できる。この組織は天然のマイロナイト中に発達する剪断の集中により形成される地震の痕跡である薄いシュードタキライト層の形成にも通じるところがあると考えられる。

これら一連の成果は現在ユトレヒト大学の Chris Spiers 教授らと論文の準備中である。

#### <引用文献>

Niemeijer, A. R. and Spiers, C. J., Velocity dependence of strength and healing behaviour in simulated phyllosilicate-bearing fault gouge, Tectonophysics 427, 231 - 253, 2006.

Niemeijer, A. R. and Spiers, C. J., A microphysical model for strong velocity weakening in phyllosilicate-bearing fault gouges, JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 112, B10405, doi:10.1029/2007JB005008, 2007.

#### 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 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

Miki Takahashi, Martijn van den Ende, Andre Niemeijer and Chris Spiers, Thin shear localization in matured mylonitic rock, 2015 年 5 月 24 日, 日本地球惑星科学連合 2015 年連合大会, 幕張メッセ(千葉市)

〔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：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：

取得年月日：

国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

高橋美紀 (Miki Takahashi)

研究者番号：40470033

##### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

##### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：