

平成 29 年 6 月 12 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870918

研究課題名(和文)未固結堆積物・ガウジの固化に伴う変形時の力学・水理特性の変化に関する実験的研究

研究課題名(英文) Experimental study on mechanical and hydraulic properties during lithification of sediments and fault gouge

研究代表者

野田 博之(Noda, Hiroyuki)

京都大学・防災研究所・准教授

研究者番号：50619640

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：熱水条件下での石英粉末の圧密・変形実験や、高温高压高間隙圧下での岩塩の変形実験を行った。特筆すべき成果として、脆性塑性遷移域での間隙流体圧の影響に関して定説を覆す実験結果を得たが、実験結果を説明できる理論を提唱、有効応力則の理解に関する重要な進展を得た。実験技術に関し、測定した力学データから試験機の摺動部の抵抗を取り除く手法を見出した。本成果により、今後より高精度の実験データの取得が期待できる。計画実施期間中に、圧力溶解クリープの微物理モデルがオランダのグループにより提案された事を受け、彼らのモデルを高度化、地震サイクルシミュレーションに組み込む事に成功した。

研究成果の概要(英文)：Consolidation and deformation experiments of quartz powder under hydrothermal conditions and friction experiments of NaCl with high pressure, high temperature, and high pore pressure were conducted. In particular, new data for the effect of pore fluid pressure in brittle-plastic transition contradicted conventional notion. A new theory explaining the data was proposed, promoting understanding of the effective stress law. A new method to correct mechanical data during deformation experiments by removing resistance of the actuator and O-rings was developed. This enables us to obtain mechanical data of better quality in future. During the present plan, a new microphysical model for pressure solution creep was proposed by a group in Netherlands. This model was regularized and successfully implemented in earthquake sequence simulations.

研究分野：断層力学

キーワード：岩石実験 脆性塑性遷移 地震サイクル

1. 研究開始当初の背景

(1) 主に未固結の土を扱う土質力学, 固結した岩石の破壊・変形を扱う岩石力学はそれぞれの分野において一定の成功を収めている。しかし, 堆積物の岩石化や断層の摩耗物が繰り返す変形・固化は未固結・固結間の遷移のプロセスであり, この遷移における水理・力学挙動の理解は十分に理解されているとは言いがたい。巨大地震時の付加体浅部の挙動や, 地震を繰り返す断層の挙動を理解する為には, 物質の未固結・固結遷移時の物性の理解が重要である。

2. 研究の目的

(1) 本研究は, 粉体試料が固化する際の水理的・力学的性質の変化を実験的手法で明らかにする事を目的とする。また得られた性質を説明するモデルを構築し, 断層運動等の数値シミュレーションに導入, その地学現象における重要性を調べる。

3. 研究の方法

(1) 実験には, 高温高压変形透水試験機を用い, 試料にはアナログ物質として石英粉末や岩塩を用いる。高温, 高压, 高間隙流体圧の元で圧密・変形実験を行い, サンプルの強度等を測定する。

(2) 実験的知見を基に, 断層の力学的性質を表現できるモデルを定式化, 動的な地震サイクルシミュレーションに組み込む。

4. 研究成果

(1) 熱水条件下における石英粉末の圧密実験を行い, 圧密に伴い剪断強度が上昇する事(図1)、実験条件において粒子接触部における圧力溶解が重要な働きをしている事を確認した(学会発表①)。

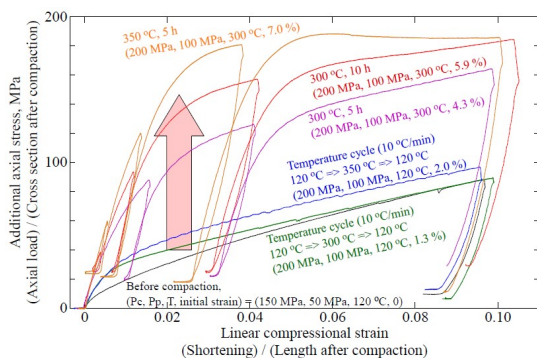


図1. 石英粉末の圧密・固結実験後の変形実験。圧密量に伴い剪断強度が増加。

(2) 計画実施期間中に, 石英・粘土混合物に関する圧力溶解クリープの微物理モデルがオランダのグループにより提案された(引用文献①)事を受け, 彼らのモデルを高度化し, 地震サイクルシミュレーションに組み込む事に成功した(論文①)。既存の速度・状態依存摩擦構成則では, 断層面の強度を決める

状態変数の物質科学的意味ははっきりしない物であったが, 微物理モデルに基づいた本構成則では間隙比が状態変数となっている。地震サイクルにおける間隙比の時空間変化を数値モデルで追えるようになった(図2)。また, 本モデルでは地震発生層の直下に圧力溶解クリープによる線形粘性的な層の存在が示唆される。その部分は強度の変形速度依存性が大変大きく, 余効滑りの量がこれまでのモデルに比べて大変小さくなる。今後の地球物理学的観測との比較が重要である。

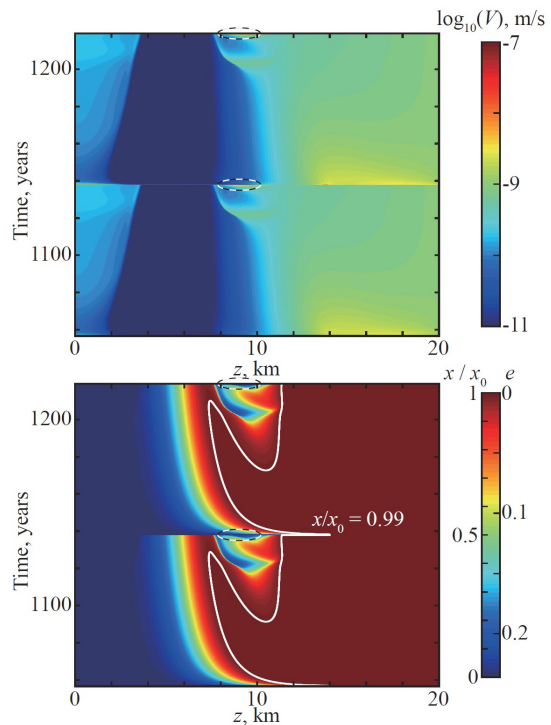


図2. 論文①より抜粋。圧力溶解クリープを考慮した摩擦構成則を用いた, 地震サイクルシミュレーションの結果。上: 断層面上の滑り速度の時空間分布。横軸は深さ。下: 状態変数である間隙比の時空間分布。

(3) 岩塩の高温高压変形実験では, 高温で試料が結合力を獲得し, 力学的性質が摩擦的で無くなる(脆性塑性遷移)。その様な条件下における間隙流体圧の剪断強度に対する影響を実験的に明らかにし, いわゆる「有効応力則」の脆性塑性遷移域への拡張を提唱した(論文②)。剪断帯の強度 τ は, 脆性領域では摩擦係数 f , 垂直応力 σ_n , 間隙水圧 P_f を用いて $\tau = f(\sigma_n - \alpha P_f) = f \sigma_n'$ とあらわされ, ここで σ_n' は有効垂直応力と呼ばれ, α は剪断帯の面積に対する空隙の占める割合と信じられてきた。岩石の固結が進み真実接触面積が増大すると, α が1から優位に低下し, P_f の影響が少なくなる事が予想されていた。実際に岩塩を用いた脆性・塑性遷移利用域における実験をしてみた所, τ と $P_c - P_f$ の関係が非線形であり, 剪断強度は常に封圧 P_c と P_f の差に依存し, α は1である事を発見した。この事は, 散逸を担う微視的な非弾性変形機構が, 局所的な偏差応力に依存するプ

ロセスである事を仮定すれば導出できる。

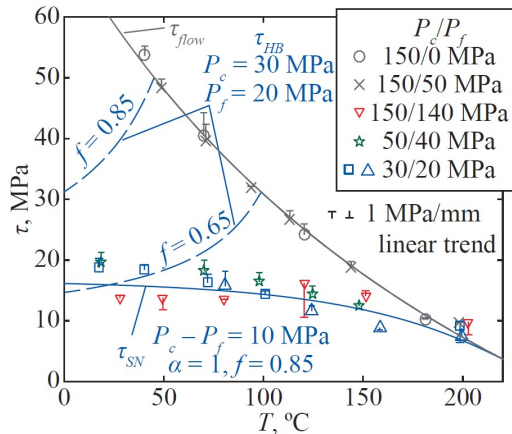


図3. 論文②より抜粋。異なる封圧・間隙流体圧における岩塩剪断帯の変形実験結果。異なる P_c におけるデータが同一トレンドに載る事が、 $\alpha = 1$ を示している。既存のモデルによる予測は破線であり、実験データとはかけ離れている。

(4) 本計画中に行った変形実験は、比較的低い固結度、もしくは結晶塑性変形の影響で強度が低い試料を用いた物が多い。その様な場合、変形実験の摺動部の抵抗が無視できず、測定した力学データからこれを除去する技術が必要となった。試験機の载荷システムをモデル化し(図4上)、内部荷重計、外部荷重計の出力差に着目する事により摺動部の抵抗を推定、出力を補正(図4下)する手法を開発した(論文③)。本成果により、今後より高精度の実験データの取得が期待できる様になった。

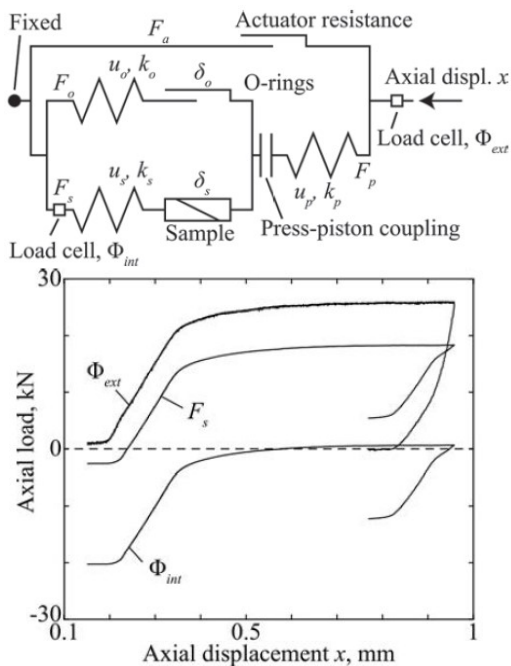


図4. 論文③より抜粋。上：変形試験機のモデル。下：実験中の内部荷重計 (Φ_{int})、外部荷重計 (Φ_{ext}) の出力と、摺動部の抵抗を補正した結果 (F_s)。

(5) 本計画期間中に、東日本太平洋沖地震の震源断層掘削プロジェクトにより採取された断層物質の摩擦実験が行われた(引用文献②)。実験は広い温度・滑り速度レンジを対象に実施され、単純な摩擦構成則ではパラメータとして仮定されている性質が、実験条件によって変化する複雑な性質が得られた。そのような物性を表現できる様、既存の摩擦構成則の一般化を行い、地震サイクルシミュレーションに導入した(学会発表⑦)。地下の間隙水圧分布や摩擦構成則の持つ長さスケールに関するパラメータスタディの結果、巨大地震サイクルとその間に大地震が数回発生するスーパーサイクル挙動(図5)を示し、周期、長期的及び地震時の摩擦発熱量等の点で日本海溝沈み込み帯断層の過去の挙動の報告と合致するモデルを得た。

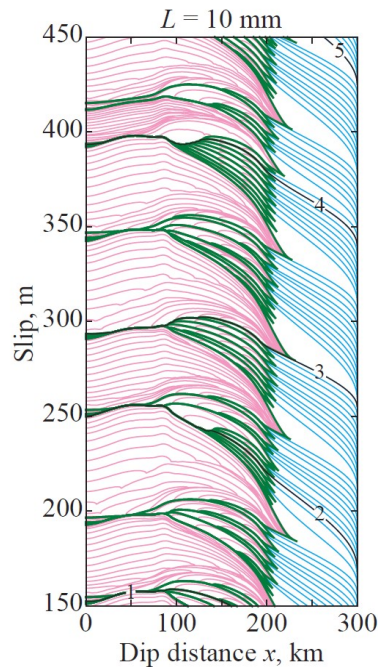


図5. スーパーサイクル挙動を示す地震サイクルシミュレーションの例。黒線は1000絵年毎、青線は50年毎、赤線は地震時の10秒毎の滑り量分布を表す。浅部には掘削試料より得られた物性値を与えている。

<引用文献>

- ① den Hartog, Sabine A. M., Christopher J. Spiers, A microphysical model for fault gouge friction applied to subduction megathrust, *J. Geophys. Res.*, 119, 2014, 1510-1529, doi:10.1002/2013JB010580
- ② 澤井みち代, Frictional properties of materials along subduction plate boundaries and implications for the 2011 Tohoku-oki earthquake, 博士論文、広島大学、2015

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3件)

① Hiroyuki Noda, Implementation into earthquake sequence simulations of a rate- and state-dependent friction law incorporating pressure solution creep, *Geophys. J. Int.*, 査読有, 205(2), 2016, 1108-1125

<https://academic.oup.com/gji/article/205/2/1108/687505/Implementation-into-earthquake-sequence> / DOI:10.1093/gji/ggw058

② Hiroyuki Noda, Miki Takahashi, The effective stress law at a brittle-plastic transition with a halite gouge layer, *Geophys. Res. Lett.*, 査読有, 43, 2016, 1966-1972

<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015GL067544/abstract> / DOI:10.1002/2015GL067544.

③ Hiroyuki Noda, Miki Takahashi, Technical note: Correction of output from an internal load cell in a high-pressure triaxial deformation apparatus without a split-piston, *J. Geol. Soc. Japan*, 査読有, 122, 12, 2016, 653-658

https://www.jstage.jst.go.jp/article/geosoc/122/12/122_2016.0047/_article-char/ja/ / DOI:10.5575/geosoc.2016.0047

[学会発表] (計7件)

① Hiroyuki Noda, Keishi Okazaki, Ikuo Katayama, Strengthening of synthetic quartz-rich sediments during time-dependent compaction under hydrothermal conditions, AOGS 11th Annual Meeting, Royton Sapporo Hotel, Sapporo, Japan, Aug. 1, 2014

② Hiroyuki Noda, Toshihiko Shimamoto, Dynamic earthquake sequence simulations with fault constitutive law accounting for brittle-plastic transition and pressure solution-precipitation creep, EGU General Assembly 2015, TS1.2/EMRP4.6, EGU2015-7768, Vienna, Austria, April 14, 2015

③ Hiroyuki Noda, A rate- and state-dependent friction law accounting for pressure solution-precipitation creep in clay-quartz mixture and its implementation to earthquake sequence simulations, Seismological Society of Japan 2015 fall meeting, S08-19, Kobe, Oct. 27, 2015

④ Hiroyuki Noda, Miki Takahashi, Ikuo

Katayama, Friction experiments of halite in brittle-ductile transition with high pore pressure, AGU 2015 Fall meeting, MR33A-2645, San Francisco, Calif., Dec. 16, 2015

⑤ Hiroyuki Noda, Earthquake sequence simulations using measured mechanical properties for JFAST core samples and blueschist, Theo Murphy international scientific discussion meeting on "Faulting, friction and weakening: from slow to fast motion", Kavli Royal Society Centre, Chicheley Hall, Newport Pagnell, U. K., Apr. 25-26, 2016

⑥ Hiroyuki Noda, Miki Takahashi, The effective stress law at a brittle-plastic transition: Analogue experiments with halite gouge layers, JpGU meeting 2016, SSS-27-22, Chiba, Japan, May 26, 2016

⑦ Hiroyuki Noda, Michiyo Sawai, and Bunichiro Shibazaki, Earthquake sequence simulation with lab-measured properties: Japan trench subduction zone and JFAST core samples, 123rd Annual Meeting of the Geological Society of Japan, R12-O-10, Sakurajosui, Tokyo, Japan, Sep. 10-12.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

特に無し.

6. 研究組織

(1)研究代表者

野田 博之 (NODA, Hiroyuki)
京都大学・防災研究所・准教授
研究者番号: 50619640

(2)研究分担者

無し.

(3)連携研究者

無し.

(4)研究協力者

片山 郁夫 (KATAYAMA, Ikuo)
高橋 美紀 (TAKAHASHI Miki)
岡崎 啓史 (OKAZAKI Keishi)
芝崎 文一郎 (SHIBAZAKI Bunichiro)
澤井 みち代 (SAWAI michiyo)