

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 15 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26249138

研究課題名(和文) 超高精度光ファイバ歪センサによる多相流体存在下の岩盤挙動評価の新展開

研究課題名(英文) Evaluation of rock mass behavior under the existence of multi-phase fluids by using ultra-high resolution fiber optic strain sensors

研究代表者

徳永 朋祥 (Tokunaga, Tomochika)

東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授

研究者番号：70237072

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 27,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、われわれが今まで開発を続けてきた数ナノストレインの歪計測分解能・数十Hzの時間分解能を持つ超高精度光ファイバ歪センサを用い、特に、多相流体が存在する系を対象とした岩盤挙動評価の新たな展開を図ることを試みた。そのために、原位置試験並びに室内実験を実施し、原位置試験では、空間・時間スケールの違いに応じた岩盤挙動の特性について詳細な検討を行った。また、室内実験では、極めて遅い流れの条件下における多相流れに伴う特徴的な岩石変形現象を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The behavior of rock masses under the existence of multi-phase fluid was analyzed through the usage of newly developed ultra-high resolution fiber optic strain sensors. We conducted both in-situ measurements and laboratory experiments for this study. Scale/time dependent rock mass behavior was analyzed through the long-term measurements of in-situ strains in the vault, and characteristic rock deformation behavior under the extremely slow non-wetting phase fluid movement was discovered by laboratory experiments.

研究分野：地圏環境システム学

キーワード：地殻工学 光ファイバ歪センサ 室内実験 多相流れ 地殻変動計測

1. 研究開始当初の背景

岩盤は、様々な時空間スケールで変形し、条件によっては破壊にまで至る。その例として、主に半日及び一日周期の変動である地球潮汐や、地震に伴う急激な地殻変動、地震発生間のゆっくりとした歪蓄積などがあげられる。また、地震以外にも、圧縮性流体の浸入に伴い岩盤が破壊し、泥火山のような爆発的な流体移動が引き起こされることもある。我々は、これらの岩盤変形の計測を目的として、超高精度光ファイバ Bragg グレーティング(FBG)歪センサの開発を平成 21~23 年度の科学研究費で実施してきた。その結果、研究開始時点において、30Hz の時間分解能で、数ナノストレインの計測分解能を持つ歪センサの開発に成功していた。

光ファイバセンサは、その原理からドリフトを発生させない計測系を構築することができ、これが地殻変動計測に適用するうえで決定的に優位な点である。さらに、単一光ケーブルによる多点計測の可能性がその特徴であり、様々な空間スケールの岩盤変形を比較的容易に計測できる手法として大いに期待される。また、多点計測が可能な光ファイバ歪センサを室内実験に導入することにより、変形時の歪分布を極めて高い空間分解能と精度で計測することが可能となり、岩石変形の理解に向けた新たな展開にも資することが強く期待される。

ところで、我々は、すでに、多相流動と変形の連成過程に関する構成関係の導出に成功し、それに基づく数値解析を行ってきた。その検討からは、水 - 空気二相流と岩盤変形の連成過程が歪の空間分布とその時間変化に大きく影響する可能性が高いことが示されていた。また、応力条件によっては、圧縮性流体が浸入することにより急激に破壊が進展し、流体の大規模放出が起こりうることも示されていた。最近の地圏高度利用においては、二酸化炭素地中貯留や放射性廃棄物地層処分、石油や LPG の地下備蓄等、多相流体の存在が鍵になるものが多く、変形に関するデータに加え、多相流体挙動に関するデータを取得し、それらと数値解析を組み合わせることにより、岩盤変形の理解をさらに進展させることが必要であると考えられた。

以上の背景から、2 つの研究アプローチ、すなわち超高精度・高時間分解能光ファイバ歪計測と多相流動 - 変形連成過程モデリングの融合を行うことは時宜を得ており、その意義は大きいと考え本研究を開始した。

2. 研究の目的

本研究では、我々が開発した数ナノストレインの歪計測分解能・数十 Hz の時間分解能を持つ超高精度光ファイバ歪センサの多点計測を実用化し、特に、多相流体が存在する系を対象とした岩盤挙動モデル化の新たな

展開をはかることを目的とした。室内実験では、圧縮性流体の浸入により発生する岩石の変形挙動を計測し、その結果に基づき、多相流体存在下の岩盤挙動の理解を進化させることを目指した。また、原位置計測では、不飽和領域を含む岩盤において歪計測を行い、考慮する空間・時間スケールの違いに応じた岩盤歪挙動を明らかにすることを目指した。これらの成果を統合し、多相流体存在下の岩盤挙動計測並びに評価の新たな方法を提案することを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、上述の目的を達成するために、以下の方法で研究を遂行することとした。

1) 超高精度光ファイバ歪センサを用いた原位置計測に基づく不飽和岩盤挙動計測

今までに継続して計測を実施してきた東京大学地震研究所油壺地殻変動観測所観測壕において、光ファイバ歪センサの計測を行い、データ取得をするとともに、その結果に基づき、より高度なセンサ開発に資する検討を行う。

2) 室内実験による多相流体存在下での岩石挙動の検討

岩石中に圧縮性流体を流入させることによって発生する変形挙動を計測し、我々がすでに構築した多相流動と変形の連成過程に関する数値解析コードによる評価を実施する。

3) 光ファイバ歪センサ計測と GNSS ネットワークによる岩盤歪挙動のスケール依存性の評価

油壺地域周辺の GNSS ネットワークのデータを利用した広域地殻歪挙動と、光ファイバ歪センサや石英管伸縮計測データとの比較検討を行い、岩盤挙動のスケール依存性についての検討を深める。

4. 研究成果

本研究の結果得られた主要な成果は、以下のように取りまとめることができる。

1) 超高精度光ファイバ歪センサを用いた原位置計測に基づく不飽和岩盤挙動計測

東京大学地震研究所油壺地殻変動観測所観測壕において、光ファイバ歪センサの計測を安定的に行うことを可能にした。ここでは、原位置計測系のレーザの劣化の問題への対処や、計測システム自体が発生する熱による計測環境変化の問題への対処を行い、成果を得た。また、このデータに関しては、海外共同研究者のチーム並びに本研究に参画する

国内研究者の両者がデータをリアルタイムでモニタリングできるようにするためのデータ転送システムを整備した。このシステムは現在も継続して利用されており、データの蓄積が行われている。また、この計測で得られた知見に基づく、光ファイバ歪センサの改良を行い、本研究終了時点では、 10^{-11} の歪を計測紙、さらに地震動も捉えることができる能力を持つセンサを作成することに成功した。最新のセンサに関しては、今後、海外共同研究者を中心に、海外での設置が試みられる予定になっている。

2) 室内実験による多相流体存在下での岩石挙動の検討

極めて遅い流量条件下での多相流体挙動においては、既存の物理モデルに基づく解析では、実験結果を適切に表現することが困難であることが明らかになった。これは、多相流動における「流れのレジーム」の概念を、変形挙動の理解においても導入することが極めて重要であることを示唆していると解釈された。特に、極めて遅い流れ場においては、流路が不均質に形成される「フィンガリング」を考慮し、流れと変形の連成系を考慮することの重要性が示された。

3) 光ファイバ歪センサ計測と GNSS ネットワークによる岩盤歪挙動のスケール依存性の評価

油壺地域周辺の GNSS ネットワークのデータを利用し、広域地殻歪に関する時系列データについて解析を行い、油壺地殻変動観測所観測壕での計測データとの比較検討を行った。特に、歪の主軸方向等の時間的な変化に着目した解析を行い、岩盤挙動のスケール依存性や、大規模地質構造の影響について検討を行った。ローカルスケールでの変形の観点からは、油壺地殻変動観測所観測壕での計測データと気象データ、海洋潮汐データとの比較を行い、岩盤への荷重条件に伴う変形挙動について詳細な検討を行った。また、観測所周辺の地形条件が、計測結果に与える影響についても検討を行った。これらの成果については、今後も学会等で発表をする予定にしている。

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4件)

He, Z., Liu, Q., Chen, J. and Tokunaga, T., in press, Ultrahigh resolution fiber Bragg grating sensors for quasi-static crustal deformation measurement. *Journal of Lightwave Technology*. (査読有)

徳永朋祥, 2015, 放射性廃棄物処分と

地下水流動. *地盤工学会誌*, 63, 28-31. (査読無)

Liu, Q., He, Z. and Tokunaga, T., 2015, Sensing the earth crustal deformation with nano-strain resolution fiber-optic sensors. *Optics Express*, 23, A428-A436. (査読有)

Goto, H., Tokunaga, T., Aichi, M., Yamamoto, H., Ogawa, T. and Aoki, T., 2014, Quantitative study on experimentally observed poroelastic behavior of Berea sandstone in two-phase fluid system. *Journal of Geophysical Research*, 119, 6211-6228. (査読有)

[学会発表](計11件)

Higuchi, K., Tokunaga, T., Kato, T., Aichi, M. and Shimada, S., 2016, Comparisons of long-term trends of crustal strain and its principal axes measured by quartz tube extensometers and GNSS in southwestern Miura Peninsula, Japan. American Geophysical Union, Fall Meeting, December 12 to 16, San Francisco (USA).

樋口 衡平・徳永朋祥・愛知正温・島田 誠一, 2016, 三浦半島南西部における石英管伸縮計と GNSS を用いた地殻歪の長期トレンドの比較. 日本測地学会第126回講演会, 2016年10月19~21日, 奥州市文化会館(岩手県奥州市).

後藤 宏樹・徳永朋祥・愛知正温, 2016, 二相流の流動様式が泥岩の変形に与える影響の検討. 日本地球惑星科学連合2015年大会, 2016年5月22~26日, 幕張メッセ国際展示場(千葉県千葉市).

Aichi, M., 2016, A procedure for seiche analysis with Bayesian information criterion. EGU General Assembly, April 17 to 22, Vienna (Austria).

樋口 衡平・徳永朋祥・島田 誠一, 2016, 三浦半島油壺での歪と GPS 解析に因る周辺の地殻変動との関係. 「GPS 大学連合」& 「地殻変動連続観測」年次集会, 3月22日, 東京大学地震研究所(東京都文京区).

Aichi, M. and Tokunaga, T., 2015, Poroelastic modeling to assess the effect of water injection for land subsidence mitigation. 9th International Symposium on Land

Subsidence, November 15 to 19, 名古屋国際会議場 (愛知県名古屋市).

Chen, J., Liu, Q., Fan, X., Ma, L., Du, J., Tokunaga, T. and He, Z., 2015, 0.1-nano-strain resolution fiber-optic sensor for quasi-static strain measurement with 1 kS/s sampling rate. 24th International Conference on Optical Fibre Sensors, September 28 to October 2, Curitiba (Brazil).

後藤宏樹・愛知正温・徳永朋祥・山本肇・小川豊和・青木智幸, 2015, 室内実験で観察された二相流体存在下における Berea 砂岩の多孔質弾性挙動の定量的解釈. 日本地球惑星科学連合 2015 年大会, 5 月 24~28 日, 幕張メッセ国際展示場 (千葉県千葉市).

Aichi, M., 2015, Time series analysis of hydraulic head and strain of subsurface formations in the Kanto Plain, Japan. EGU General Assembly, April 12 to 17, Vienna (Austria).

He, Z., Liu, Q. and Tokunaga, T., 2014, Sensing the Earth crustal deformation with nano-strain resolution fiber-optic sensors. Optical Instrumentation for Energy and Environmental Applications 2014, December 2 to 5, Canberra (Australia)

Aichi, M., 2014, Analytical solution for the poroelastic responses in pulse decay permeability tests. EGU General Assembly, May 1, Vienna (Austria).

〔産業財産権〕

取得状況 (計 1 件)

名称 : 流量測定装置
発明者 : 山本肇・徳永朋祥・茂木勝郎・後藤宏樹
権利者 : 同上
種類 : 特許
番号 : 特開 2017-32309
取得年月日 : 2017 年 2 月 9 日
国内外の別 : 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

徳永 朋祥 (TOKUNAGA Tomochika)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・教授
研究者番号 : 7 0 2 3 7 0 7 2

(2) 研究分担者

山本 肇 (YAMAMOTO Hajime)
大成建設株式会社技術センター・土木技術研究所 地盤・岩盤研究室・チームリーダー
研究者番号 : 1 0 4 1 7 0 9 0

愛知 正温 (AICHI Masaatsu)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・講師
研究者番号 : 4 0 6 4 5 9 1 7

(3) 研究協力者

樋口 衡平 (HIGUCHI Kohei)
東京大学・大学院新領域創成科学研究科・特任研究員

茂木 勝郎 (MOGI Katsuro)
東京大学・大学院工学系研究科・技術専門職員