

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月3日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21246133

研究課題名（和文） 超高精度・多点型光ファイバ歪センサの実用化と岩盤・地下水連成挙動のモニタリング

研究課題名（英文） Application of ultra-high resolution, multiplexed fiber optic strain sensor for monitoring coupled deformation/fluid flow process in rock mass

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

研究成果の概要（和文）：本研究では、超高分解能光ファイバ歪センサを開発し、世界初となる 2.6×10^{-9} の静的な歪分解能を実現した。また、実岩盤への適用を行い、基線長 1m スケールの岩盤歪を、世界で初めて 1×10^{-8} の分解能で計測することに成功した。また、空洞を含む岩盤内における地下水挙動と変形を適切にモデル化するための構成関係式の導出と、それに基づくシミュレータの開発を行った。特に、岩盤内が完全に水で飽和されていない状況での水・空気の流動と変形との連成過程を取り扱うモデルの構築に成功した。

研究成果の概要（英文）：Ultra-high resolution fiber-optic strain sensor was developed, and we demonstrated the static-strain resolution of the developed sensor to be 2.6×10^{-9} . The sensor was applied to the actual rock mass environment at Aburatsubo, Japan, and we successfully measured the strain on the order of ten nano-strain, of which baseline length was 1 m. We also derived thermodynamically consistent constitutive equations for the coupled two-phase flow and deformation processes of porous media, and developed a numerical simulator based on the derived constitutive equations.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	12,900,000	3,870,000	16,770,000
2010年度	12,300,000	3,690,000	15,990,000
2011年度	9,300,000	2,790,000	12,090,000
総計	34,500,000	10,350,000	44,850,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学、地球・資源システム工学

キーワード：地球計測、フォトニックセンシング

1. 研究開始当初の背景

「固体」地球は様々な時空間スケールで変形している。地表や地下に構築されている社会基盤構造物は、人間活動に伴う擾乱に加え、地震による急激な変形や、地震発生間のゆっくりとした歪蓄積による影響をうけることになる。本研究課題では、最近 15 年ぐらいの間に応用が進められてきている光ファイバセンサの更なる改良と地殻変動観測への適用を目的とした研究を実施する。これは、

1km を越す計測範囲・距離を対象とした設置における光ファイバセンサの価格優位性、長期安定性、単ケーブルによる多種センサ設置の可能性、また、将来的な手法の改善、低価格化、高速化への期待がもたれるからである。

光ファイバ計測を用いた技術として最近脚光を浴びてきているものに構造健全性モニタリングがある。Glisic and Inaudi(2007)の教科書では、ビル構造物や橋梁に加え、岩

盤が対象となる構造物であるダム、トンネルなど様々な社会基盤構造物への応用に関しても記述がなされている。彼らは、「モニタリングは本来安全とつながるものである」と述べているが、これは、人工構造物において、構造物の異常な挙動を把握することにより破滅的な破壊が起こる以前の補修が可能になるからである。地震や地下構造物の問題は、ビル構造物や橋脚といった人工構造物よりも複雑な系を対象とするものであるが、同様の目標をモニタリングに対して設定することができると考えられる。Glisic and Inaudiは、「構造健全性モニタリングの重要性にも係らず、実際の計測はまだそれほど一般的にはなっていない。」と述べているが、これは、現状のモニタリングにかかる費用の高額さがその理由の一端であろう。光ファイバセンサは、まだその地位を確立していないが、現在の状況を変化させる可能性を秘めたものである。

以上の現状を鑑みると、光ファイバ歪センサを岩盤構造物を対象とした構造健全性モニタリングに資するためには、現状の分解能を格段に向上させることおよび、そのセンサを実岩盤に設置し、高分解能の歪データを取得することが必要となる。また、その結果を適切に評価するための岩盤挙動モデルを構築することも必要である。

2. 研究の目的

本研究課題の主要な目的を、岩盤変形のモニタリングに対する光ファイバセンサの持つ優位性を明らかにし、さらに、光ファイバセンサ技術を高度化することにより、既存技術では計測できない岩盤変形のシグナルの検知を可能にすることとする。具体的な目標として、地殻変動計測においてベースライン計測となる地球潮汐変動を観測できるレベルとして 10^{-8} 歪を設定し、多点での計測を可能にする新しいセンサを開発・実用化する。また、実際の岩盤を対象とした計測を行うシステムとしての実用化を行い、観測されたデータを間隙水圧変動とあわせて解析する手法を確立する。すなわち本研究課題で期待される成果は、1) 新世代型の超高分解能光ファイバグレーティング(FBG)歪センサの実用化、2) 超高分解能 FBG 歪センサの地下空間への展開と実際の計測の実現、そして、3) 計測されたデータを用いた岩盤変形・間隙水圧連成挙動評価手法の開発、である。

3. 研究の方法

(1) 超高精度 FBG 歪センサの開発と実用化

地下空間の構造安全性モニタリングにおいては、様々なスケールの歪計測を大空間に対して実施することが望ましい。また、地球潮汐歪の計測を可能にするためには、 10^{-8} 歪

の精度(歪分解能)が必要となる。このような高精度歪センサは、DST、FBG どちらの手法でも現状では実現できていない。DST で用いられるブリルアン散乱センサの精度は $1 \sim 10 \times 10^{-6}$ 歪程度であり、原理的に精度の更なる向上は困難である。現在提供されている FBG センサでは 10^{-6} 歪程度の計測が可能であるが、原理的には、その精度を $10 \sim 100$ 倍程度まで向上させることが可能であると考えられる。そこで、本研究計画の主要な目標の一つとして、地下深部の岩盤を対象とした、多点型超高精度 FBG センサの開発を設定する。目標性能は以下のとおりである。

- ①精度(歪分解能): 10^{-7} 歪(第一ステップ)、 10^{-8} 歪(第二ステップ)
 - ②測定レンジ(全長): $10 \sim 100\text{m}$ 、もしくはそれ以上
 - ③センサ間隔(空間分解能): $10 \text{ cm} \sim 1\text{m}$ (測定レンジに依存)
 - ④センサ数: $10 \sim 100$ 個、もしくはそれ以上
- 上記目標性能を達成するにあたっての課題は、以下のようなものと考えている。

1550nm 波長における FBG では、歪一波長(周波数)変換係数は 10^{-6} 歪あたり約 1.2pm (150MHz) である。 10^{-8} 歪の解像度を達成するためには、FBG センサシステムの精度は周波数にして 1.5MHz となる。この分解能を実現するためには、下記の各点を適切に解決していくことが必要となると考えられる。

- FBG 反射スペクトルの帯域幅
- 光源の線幅
- 光周波数の精密チューニング
- 光源長期安定性
- 温度補償
- 偏波変動影響の対応
- 設置技術

本研究では、これらの各点に関する検討を個々に実施することにより、平成 21 年度には 10^{-7} 歪の計測を、平成 22 年度には 10^{-8} 歪の計測を可能にすることを目標とする。なお、センサを岩盤に設置する技術は、有意義な計測を実施するために大変に重要な課題である。設置技術開発の部分の研究は、以下に記述するプロトタイプセンサの設置を通じて実施する予定である。

(2) 東京大学地震研究所油壺地殻変動観測坑における設置と計測

東京大学地震研究所は、神奈川県三浦市にある油壺地殻変動観測坑において、石英管伸縮計を用いた地殻変動計測を継続して実施してきている。第三系の堆積岩中に掘削された坑道の一部を本研究にも利用することができることから、超高精度 FBG 歪センサを設置し、計測を実施するとともに、石英管伸縮計の計測結果との比較を行い、その妥当性を評価する。特に、当該地点は、海洋潮汐荷重

に伴う歪が計測されていることが知られていることから、 10^{-8} オーダーの歪計測に関する検討を容易に行うことが可能である。油壺験潮所においては、潮位そのものの計測も行われていることから、荷重に伴う変形についての定量的な議論も将来的には可能になると考えている。

(3) 岩盤変形と流動を評価するモデルの開発

地下空間における変動を解析するためには、計測された歪・間隙水圧・傾斜を適切に解析する必要がある。ここでは、研究代表者が研究を進めてきている異方性多孔質弾性論をさらに拡張し、間隙中に水・空気の二相流体が存在する系に対する変形と流動の連成過程を評価可能なモデルを開発する。特に、モデルの開発に当たっては、熱力学的に整合性のある構成関係式を構築することを目標とし、それを数値解析コードに反映させることにする。

4. 研究成果

本研究では、狭線幅波長可変レーザーを用いて、超高分解能ファイバブラッググレーティング (FBG) センサシステムの開発を実施した (図 1)。ここでは、複数の FBG を用いたシステムを導入することとし、センサのパラメータを最適化することにより、超高分解能の実現を目指した。その結果、世界初となる 2.6×10^{-9} の静的な歪分解能を実現した。また、開発されたセンサを神奈川県油壺にある東京大学地震研究所油壺地殻変動観測坑に複数設置し、本システムにおいても、一本の光ファイバセンサで複数地点の歪計測が可能であることを実証するとともに、実際の岩盤歪計測を開始した。その結果、海洋潮汐に起因する岩盤歪の計測に成功した (図 2)。この結果も、光ファイバ FBG 歪センサによって、世界で初めて 1×10^{-8} の静的な歪分解能を現地で検証したものである。上記の計測を実現するために、本研究では、新たなセンサヘッドの開発を行っている。特に、地殻変動計測において主要な変形の信号を正確に計測するために、環境の影響、特に温度影響を補償することを可能にするセンサヘッドを構築し、実フィールドへの設置を行った。具体的には、図 1 に示すように、複数の同じ Bragg 波長を示す FBG をセットにして設置し、歪計測と、環境影響評価とを各々の FBG で行い、cross-correlation 法の適用により、環境影響を取り除くことに成功した。その結果が、上記の分解能を達成するための主要な技術開発成果の一つである。

さらに高周波数のシグナルの計測を可能とするために、ファイバ干渉計 (FFPI) を用いたセンサ技術を開発した。この方法では、位相変調と強度変調を組み合わせることに

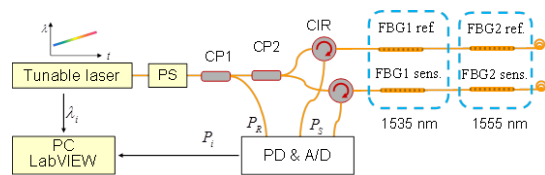


図 1：今回開発した超高分解能光ファイバ歪センサシステム概念図。CP:カプラ、CIR:サーキュレータ、PS:ポラライゼーションスクランブラー、PD:フォトダイオード、A/D:A/D コンバータ。

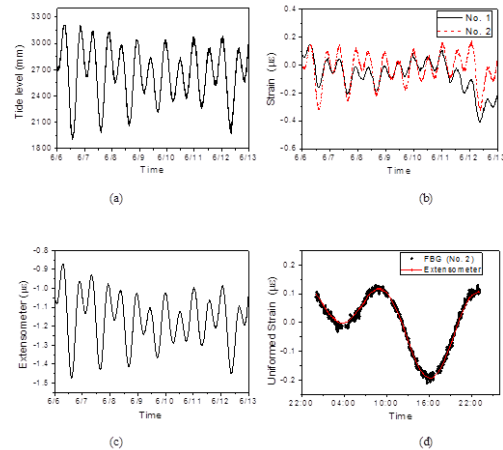


図 2：東京大学地震研究所油壺地殻変動観測坑における計測結果。(a) 油壺験潮所における吊意計測結果。(b) 光ファイバ歪センサによる歪計測結果。(c) 石英管伸縮計による歪計測結果。(d) 2011年6月8日の計測データを用いた光ファイバ歪センサと石英管伸縮計による計測の比較。石英管伸縮計による計測データを 0.76 倍し、位相を調整して結果を比較したもの。

より、独創的な側波帯計測技術を提案した。この技術は 10^{-9} を超える歪分解能と数 Hz までの計測を可能とするという特徴を持っている。この技術に基づく現地実験は、東京大学地震研究所油壺地殻変動観測坑において現在進行中である。

上記と並行し、地下空洞内における局所的な微小変形を観測するためのセンサパッケージング方法の検討を実施した。具体的には、原子力機構幌延深地層研究所において光ファイバ式地中変位計に用いられているセンサ部の形状を踏襲しつつ、そこで観測された長期間の計測における微小な変位のドリフトを改善するための方策として、ベースに FBG 光ファイバ部を接着せずかつ CFRP を素材として一体成型によりパッケージングする方法を開発した。また、開発した CFRP 光ファイバセンサ部の特性を調べるための室内校正試験を実施した結果、幌延深地層研究所で設置している微小変位計用光ファイバ

変位計（測定レンジ 1mm）と同等の測定レンジ内で圧縮・引張いずれの変形モードにおいても応力—変位—波長変化の間に非常に良好な直線関係を得ることができ、微小な長期変形計測のための有効性を示すことができた。

モデル開発においては、空洞を含む岩盤内における地下水の挙動と変形を適切にモデル化するための構成関係式の導出と、それに基づくシミュレータの開発を実施した。ここでは、特に、岩盤内が完全に水で飽和されていない状況での水・空気の流動と変形との連成過程を取り扱うことが必要となるために、まず、現象を熱力学的に矛盾なく表現することができる構成関係の導出から研究を実施した。その成果として、理論的な一般性が高く、かつ既存の室内実験技術により評価しうる物性パラメータのみから記述された構成関係の導出に成功した。また、導出された構成関係に基づく数値解析コードの開発を行い、その検証を行った。

以上、本研究は、当初の目的をほぼ達成したものと判断している。

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 6 件）

- ① Liu, Q., Tokunaga, T., Mogi, K., Matsui, H., Wang, H. F., Kato, T. and He, Z., in press, Ultra-high resolution multiplexed fiber Bragg Grating Sensor for Crustal Strain Monitoring. IEEE Photonics Journal. (査読有) (掲載確定)
- ② Liu, Q., Tokunaga, T. and He, Z., Sub-nano resolution fiber-optic static strain sensor using a sideband interrogation technique. Optics Letters, 37, 434-436, 2012. (査読有)
- ③ 愛知正温・徳永朋祥, 多孔質弾性体中の二相流・変形連成過程の定式化—現状と今後の課題・展望—。地学雑誌, 121, 39-52, 2012. (査読有)
- ④ Liu, Q., Tokunaga, T. and He, Z., Realization of nano static strain sensing with fiber Bragg gratings interrogated by narrow linewidth tunable lasers. Optics Exp., 19, 20214-20223, 2011. (査読有)
- ⑤ Liu, Q., Tokunaga, T. and He, Z., Ultra-high-resolution large-dynamic-range optical fiber static strain sensor using Pound-Drever-Hall technique. Optics Lett., 36, 4044-4046, 2011. (査読有)
- ⑥ Aichi, M. and Tokunaga, T.,

Thermodynamically consistent anisotropic constitutive relations for a poroelastic material saturated by two immiscible fluids. Intern. J. Rock Mech. Min. Sci., 48, 580-584, 2011. (査読有)

〔学会発表〕（計 24 件）

- ① Liu, Q., Tokunaga, T., Mogi, K., Matsui, H., Wang, H. F., Kato, T. and He, Z., 2012, Field demonstration of 10-nano static strain resolution multiplexed FBG sensor for geophysical applications. 3rd Asia-Pacific Optical Sensors Conference, Sydney, January 31, 2012.
- ② Liu, Q., He, Z., Tokunaga, T. and Hotate, K., 2011, An ultra-high-resolution large-dynamic-range fiber optic static strain sensor using Pound-Drever-Hall technique. 2011 CLEO Pacific Rim Conference, 130-132, Sydney, August 29, 2011.
- ③ He, Z., Liu, Q. and Tokunaga, T., 2012, Realization of nano-strain-resolution fiber optic static strain sensor for geo-science applications. CLEO 2012, Ottawa, May 18, 2011.
- ④ Wang, H. F., Gage, J. R., Fratta, D., MacLaughlin, M., Murdoch, L. C. and Tokunaga, T., Deep underground instrumentation and monitoring. Proc. 6th Asian Rock Mech. Symp., New Delhi, October 25, 2010.
- ⑤ Tokunaga, T., Matsui, H., He, Z., and Kashiwai, Y., Studies on deformation/pore pressure coupling processes at Japanese URLs and the development of ultra-high resolution FBG strain sensors for rock mechanics. American Geophysical Union, Fall Meeting, San Francisco, December 15, 2009.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.u-tokyo.ac.jp/coe/japanese/achievements/category2/base5/report05-03.html>

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：70237072

(2) 研究分担者

何 祖源 (HE ZUYUAN)
東京大学・大学院工学系研究科・特任教授
研究者番号：70322047

松井 裕哉 (MATSUI HIROYA)
独立行政法人日本原子力研究開発機構・地
層処分研究開発部門・研究副主幹
研究者番号：30421655

(3) 研究協力者

別府 輝一 (BEPPU TERUKAZU)
株式会社 アサノ大成基礎設計株式会
社・技術研究所

柏井 善夫 (KASHIWAI YOSHIO)
株式会社 大成基礎設計株式会社・技術研
究所

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

愛知 正温 (AICHI MASAATSU)
東京大学・人工物工学研究センター・特任
助教

劉 慶文 (LIU QINGWEN)
東京大学・大学院工学系研究科・博士課程
学生