

戦略的国際科学技術協力推進事業（日本－米国研究交流）

1. 研究課題名：「地下大規模空間における岩盤挙動モニタリングのための超高精度多点型光ファイバグレーティング歪センサの開発」
2. 研究期間：平成21年1月～平成24年3月
3. 支援額： 総額19,181,000円
4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	徳永 朋祥	東京大学	教授
研究者	何 祖源	東京大学	特任教授
研究者	松井 浩哉	独立行政法人日本原子力研究機構	研究副主幹
研究者	柏井 善夫	大成基礎設計株式会社	技師長
研究者	茂木 勝郎	東京大学	技術専門職員
研究者	劉 慶文	東京大学	博士課程学生
参加研究者 のべ			8名

米国側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	Herbert Wang	ウィスコンシン大学	教授
研究者	Mary MacLaughlin	モンタナ工科大学	教授
研究者	Dante Fratta	ウィスコンシン大学	准教授
研究者	Larry Murdoch	クレムソン大学	教授
研究者	JoAnn Gage	ウィスコンシン大学	博士課程学生
研究者	Alan Turner	MicronOptics Co.	技師
参加研究者 のべ			9名

5. 研究・交流の目的

本研究は、亀裂などに起因する不均質性を有する岩盤内の大規模地下空間における岩盤挙動のモニタリング用に、超高精度多点型光ファイバグレーティング歪センサを開発することを目的とする。具体的には、センサ開発、センサ設置技術、計測データの解析技術、の3つのテーマについて研究を実施する。センサ開発では現状の100倍の歪み精度（10ナノストレイン）を目標とし、センサ設置技術では光ファイバの岩盤への適切な設置により、正確且つ安定に計測システムが稼働する為の手法の確立を目指し、データ解析では多孔質弾性論を亀裂系岩盤に適用できるように拡張し、さらに、歪センサと並行して計測する間隙水圧・傾斜計データを統合して解析する技術を確立する。本研究では、センサ開発を日本側研究グループが実施し、設置技術・解析技術に関しては、日本側・米国側研究グループが共同して開発を行う。また、実際の計測に関しては米国サイトで先行して行い、その結果をフィードバックさせながら日本側のサイトで技術を確立することを考えている。

## 6. 研究・交流の成果

### 6-1 研究の成果

・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) センサの開発を実施した。具体的には、センサの分解能に影響を与える項目について分析を実施し、その結果に基づきセンサのパラメータを最適化した。このような作業の結果、世界初となる  $2.6 \times 10^{-9}$  の静的な歪分解能を実現した。

・開発されたセンサを実装し、プロトタイプ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設置し、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。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  $1 \times 10^{-8}$  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、新たなセンサヘッドの開発を行った。特に、地殻変動計測において主要な変形の信号は静的 (DC) から 100Hz 程度までの範囲であり、この周波数領域での歪センシングは計測環境の影響を強く受ける。そのため、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。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。

・現在の段階での計測システムから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。この成果に関しては、すでに国際雑誌に掲載され、国際会議でも招待講演としての発表を行っている。また、東京大学地震研究所油壺地殻変動観測坑を利用した FFPI を用いたセンサによる実地実験は、現在進行中である。

・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、一般的な形式での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。このように、岩盤変形のモデル化に関しても、新たな知見の創出とそれに基づくモデル化技術の構築に成功した。

### 6-2 人的交流の成果

・本研究を通し、フォトリックセンシングの分野の若手研究者の育成に成功した。本研究に参画した若手研究者は、超高分解能光ファイバセンシングにおいては多くの成果を挙げており、今後、この分野において活躍する国際的人材として期待されている。

・本研究を行っていく中で、別プログラムではあるが、NSF-EAPSI プログラム (日本側は JSPS summer program) を通してクレムソン大学の修士課程学生を日本側研究代表者の研究室に受け入れ、共同研究を実施した。当該学生は、その成果を American Geophysical Union Fall Meeting で発表するとともに、このような活動をさらに進展させたいと希望し、今年度から博士課程でさらに研究を進めるという進路を選択した。

・本研究にモデル化の観点から参加していた若手研究者は、大学の特任教員ポストでさらなる活躍をしている。

7. 主な論文発表・特許等（5件以内）

相手国側との共著論文については、その旨を備考欄にご記載ください。

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	備考
論文	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.	
論文	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.	
論文	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.	
論文	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.	
論文	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.	