

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年6月1日現在

機関番号：12601
 研究種目：挑戦的萌芽研究
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23656262
 研究課題名（和文） 地球計測のための超高精度能動型光ファイバセンサの研究
 研究課題名（英文） Study on ultra-high-resolution active fiber-optic sensors
 for the measurement of the Earth
 研究代表者
 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

研究成果の概要（和文）：

本研究では、極狭線幅 DBR ファイバレーザを用いた新たな多重化能動型光ファイバ歪センサを提案し、0-100 Hz の低周波数領域において、ナノストレインという超高精度の歪センシング技術の創成を実証した。この技術により、地球計測・地震研究分野に求められている多地点低コストで設置・維持可能な地殻変動観測の手段を提供することが期待できる。本研究の研究成果と関連して、英文学会誌査読付論文4件、国内外学会論文19件を発表した。

研究成果の概要（英文）：

In this project, a novel multiplexed active fiber-optic strain sensor based on ultra-nano-linewidth DBR fiber laser has been proposed, and strain sensing with ultra-high strain resolution down to nano-strain at 1-100Hz low-frequency region has been demonstrated. This technique can be expected to provide crustal deformation monitoring solutions that can be built and maintained at multiple locations at reasonable cost for Earth measurement, especially for earthquake studies. Related to the achievements of this project, 4 peer-reviewed journal papers and 19 international and domestic conference papers have been published.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測工学

キーワード： センシングデバイス，地球計測，ファイバレーザ，偏波維持，複屈折，歪計測，地震研究

1. 研究開始当初の背景

地球は様々な時空間の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、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

を受けることになる。これらの地殻変動の精密観測には、地球潮汐による変形程度の 10^{-8} 以下の歪精度と潮汐周期（12.5 時間）から 100Hz 程度までの時間応答が必要されている。現在一般に用いられ、地中トンネルに設置さ

れている伸縮計は、数十メートルという長さによってこの精度を稼いでいる。例えば、東京大学地震研究所油壺地殻変動観測所のトンネルに設置された伸縮計は、長さ 38m で、ベクトル計測のため、3 方向 1 基ずつ配置されている。このような大がかりの計測施設が、不均一の岩盤に対して伸縮計の長さにおわたった平均的な歪しか測れない、より多数の地点で観測所を設置・維持することが容易でない、などの問題点を抱えている。

近年、我々は、これまで研究成果を蓄積してきた多点型・分布型光ファイバセンシング技術を発展し地殻変動観測へ適用する研究を進めてきた。光ファイバセンサは、サイズが小さく、設置が容易、低コスト、単一光ケーブルによる多点化、などの利点を持っている。従来の多点型・分布型光ファイバ歪センサには、光ファイバ中のブリルアン散乱に基づいた分布型センサと光ファイバブラッググレーティング (FBG) を用いた多点型センサがある。歪分解能の面では、ブリルアン分布型センサが 1m のファイバを対象とした計測において約 10^{-5} 歪程度、FBG センサが約 10^{-6} 歪程度の精度を持っており、いずれも地球計測に要求される 10^{-8} 以下の歪精度に達していない。我々は、まず、FBG センサの歪精度を、段階的に 1/10 から 1/100 に向上し、最低要求の 10^{-8} に達成することが可能であると考へ、先行研究 (JST-NSF 高度化センサ技術、代表：徳永朋祥) を進めてきた。FBG センサの反射スペクトルの相関処理という新たなデータ処理手法および温度補償手法の導入により、すでに実験室内で 10^{-8} 程度の静的歪精度を実証している。油壺地殻変動観測所に FBG 歪センサモジュール (全長 1m) を設置し、岩盤変形計測における FBG センサのパッケージングや敷設手法に関する研究にも着手した。これらによる歪精度の増大効果や低下効果についても検討していた (基盤研究 A、代表：徳永朋祥)。

FBG センサの歪精度を更に 10^{-9} 以下まで向上するには、以下の制限要因が存在している：①環境温度変動より、レーザ周波数と FBG スペクトルが独立にドリフトしている；② 10^{-9} 歪精度が約 150kHz の周波数変動に対応している。これに対して、一般のレーザの線幅 (約 1MHz) や FBG スペクトル幅 (約 $0.1\text{nm} = 12.5\text{GHz}$) が広すぎる。我々は、これまで提案した相関処理手法により、歪に当たる FBG スペクトルシフト量を定める精度を 10^{-8} 程度に向上したが、限界にきている感もある。また、静的歪にしか対応できていない。そこで、本研究は、数 kHz の線幅を有する DBR ファイバレーザをセンサと光源が合体した能動型の歪センサとし、0-100Hz の低周波数領域において、 10^{-9} 歪精度の実現にチャレンジする。

2. 研究の目的

本研究では、研究代表者グループが世界をリードし研究成果を蓄積してきた多点型・分布型光ファイバセンシング技術に基づいて、極狭線幅 DBR ファイバレーザを用いた新たな能動型光ファイバ歪センサを提案し、0-100 Hz の低周波数領域において、1 ナノストレインという今までにない超高精度の歪センシング技術の創成を実証する。この技術により、地球計測・地震研究分野に求められている多地点低コストで設置・維持可能な地殻変動観測の手段を提供することができ、地震観測研究や、地下大規模空間のモニタリングなどの多分野にも大きく貢献することが期待できる。具体的に、本研究では、2 偏波モード発振 DBR ファイバレーザを構成し、レーザの発振周波数とファイバの複屈折で決められる 2 偏波モード間のビート周波数との 2 つのパラメータにより、歪と温度を分離測定し、温度変動の影響を精密に補償する。よって、本研究の目的は、①新たな多点化能動型光ファイバ歪センサおよびその温度補償手法を提示する、②今まで実現できないナノストレイン歪精度にチャレンジする、③地球計測や地震研究に貢献する、ということにある。

3. 研究の方法

我々の知る限り、研究開始当時、低周波数領域において 10^{-9} 歪までの歪計測が可能な多点型光ファイバセンサは世の中にまだ実現されていなかった。また、DBR ファイバレーザをセンサと光源が合体した能動型の低周波数領域歪センサとすること、およびその温度補償手法も、斬新な提案である。さらに、 10^{-9} までの歪計測が可能な多点型センサによる岩盤挙動の高密度・高精度計測研究もなされておらず、その成果は極めてユニークなものであると考えている。

前述のように、地球潮汐歪の計測を可能にするためには、 10^{-8} 以上の歪精度 (歪分解能) が必要となる。このような高精度歪計測は、現存技術であるブリルアン分布型歪センサあるいは FBG 多点型歪センサのどちらの手法でも実現できていない。ブリルアンセンサの精度は約 10^{-5} 歪程度であり、原理的に精度の更なる向上は困難であると考えられる。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、更にその精度を 10 ~ 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。

FBG センサには、波長可変レーザを用いて、FBG ブラッグ反射スペクトルを測定し、そのスペクトルのピーク周波数のシフト量より、歪情報を抽出する基本手法がある。1550nm 波長帯における FBG では、歪-波長 (周波数)

変換係数は 10^{-6} 歪あたり約 1.2pm (150MHz) である。 10^{-9} 歪の分解能を達成するためには、FBG センサシステムの周波数精度は 150kHz となり、FBG 反射スペクトル帯域幅、光源線幅、光源周波数の長期安定性、温度補償、偏波変動効果、パッケージングおよび設置技術、などの各点を注意深く適切にクリアして行くことが必要となる。

我々は、先行研究において、FBG センサの反射スペクトルの相関処理という新たなデータ処理手法を導入することにより、光源周波数の長期安定性および温度変動影響の補償を行い、実験室内で地球計測の最低要求の 10^{-8} の静的歪精度を実証した。FBG センサの歪精度を更に 10^{-9} まで向上するには、以下の制限要因がある。①環境温度の変動より、レーザ周波数と FBG スペクトルが独立にドリフトし、歪に当たる FBG スペクトルピークシフトの測定に誤差が生じる；② 10^{-9} 歪精度が対応している 150kHz の周波数変動に対して、一般のレーザの線幅 (約 1MHz) や FBG スペクトル幅 (約 0.1nm = 12.5GHz) が広すぎて、スペクトルピークの判別に誤差が生じる。我々は、新たに提案した相関処理手法により、FBG スペクトルピークの判定精度を 10^{-8} 以下までに向上したが、更に向上することは困難である。また、静的歪にしか対応できていない。地球計測に必要な 0-100Hz 領域での 10^{-9} の歪精度を実現するには、全く新しい原理と手法の提示が必要である。

本研究では、数 kHz の線幅を有する DBR ファイバレーザに着目し、それを光源とセンサが合体した能動型センサとして構成し、上記の 2 つの制限要因を無くす。最近 DFB ファイバレーザを用いて、海の中の音響波の探査に使う高精度ハイドロフォンも報告された。海の中に温度変化が非常に緩やかなため、また、音響波の周波数は比較的に高いため、ハイドロフォンではヘテロダイン検波などの信号処理手法が利用可能であり、比較的に実現しやすい。地球計測の場合、周波数帯域は非常に低い (0-100Hz 程度) ので、低周波数ノイズや環境温度変動の影響を受けやすい。

そのために、本研究では、2 偏波モード発振 DBR ファイバレーザを構成し、レーザの発振周波数とファイバの複屈折で決められる 2 偏波モード間のビート周波数との 2 つのパラメータにより、歪と温度を分離測定し、温度変動の影響を精密に補償する。具体的に、(1) 偏波維持型 DBR ファイバレーザの設計、作成と評価、(2) 偏波維持型能動型センサにおける歪と温度の分離測定により、温度変動効果の精密補償、(3) 超高精度多点化歪セン

サの構成と評価、の 3 つの課題を設定し、シミュレーションならびに実験により実施した。

4. 研究成果

DBR ファイバレーザでは、アクティブ光ファイバ (Er 添加ファイバあるいは Er/Yb 添加ファイバ) に FBG を書きこむことによってレーザを構成する。2 つ FBG を前後反射器とした共振器を用いて、約 2kHz 程度の線幅のレーザ発振に成功している。DBR ファイバレーザに直接伸縮歪を加えると、FBG のピッチや共振器の長さが増えるので、ファイバレーザの発振周波数が増えられた歪に比例してシフトし、ファイバレーザが能動型のセンサとなる。上述のように、DBR ファイバレーザは、線幅が非常に狭いので、超高歪精度が期待できる。このために、まず、偏波維持型 DBR ファイバレーザにおける 2 偏波モード発振の条件を見出して、それぞれのモードに対して、歪感度 (歪-発振周波数シフト係数) と歪精度 (歪分解能) 対レーザ構造 (長さ、FBG 反射率、Er/Yb 添加量) の関係をシミュレーションと実験で確認し、レーザ構造の最適値を確定した。

地球計測の場合、周波数帯域は非常に低い (0-100Hz 程度) ので、低周波数ノイズや環境温度変動の影響を受けやすい。このために、2 偏波モード発振できる偏波維持タイプの DBR ファイバレーザを用いてセンサを構成する。この場合、2 偏波モードの発振周波数の中心値 (平均値) は FBG のブラッグ波長 (と共振器の長さ) で決められるが、2 偏波モード間のビート周波数はファイバの複屈折率で決められる。FBG のブラッグ波長とファイバの複屈折率は、それぞれ歪と温度の影響によって変動するが、それぞれ独立したパラメータである。よって、発振周波数とビート周波数から歪と温度を分離測定することができ、温度変動の影響を消去した純粋な歪を測定することができる。本研究では、DBR ファイバレーザにおいて、シミュレーションと実験より、歪と温度の分離測定および温度影響の補償効果を確認した。

図 1 はブラッグ波長と X, Y のビート周波数のスペクトルである。ブラッグ波長とビート周波数はファイバにかかる歪みと温度の変化に対して異なった変化を示すため、この二つを計測することにより温度の影響を除去し歪みの変化を求められる。多点化を達成するために波長可変フィルタを用いる。スペクトルの異なる複数のレーザに対し、必要な帯域にフィルタを設定して求めるレーザの信号を取り出す (図 2)。

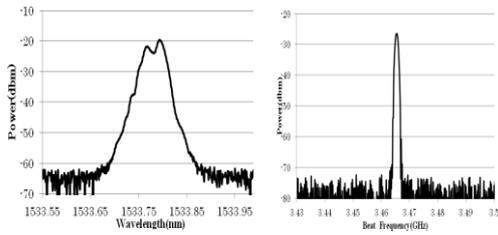


図1 偏波維持DBRファイバレーザの発振スペクトルとビートスペクトル

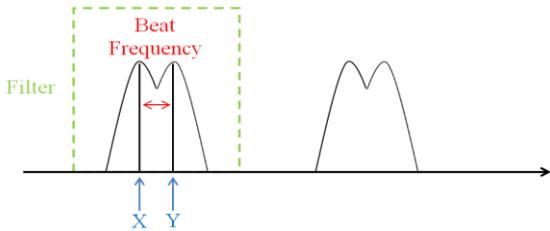


図2 多点化センシングの原理

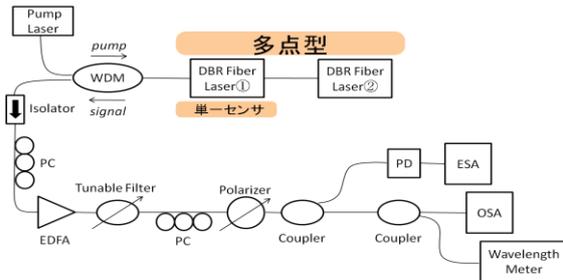


図3 偏波維持DBRファイバレーザを用いた超高精度能動型多点化歪センサの基本構成

本研究で提案する超高精度能動型多点化歪センサの基本構成を図3に示す。

センサは、DBRファイバレーザで構成する。多点化を実証するために、本研究では、まず、2つの異なる発振波長 (λ_1, λ_2) を有するDBRレーザを能動型センサ (Sensor 1, Sensor 2) として設ける。これらの能動型センサは、ポンプレーザよりエネルギーを受給する。能動型センサからの光は、光可変フィルタを通して、発振波長 (λ_1, λ_2) によってセンサ (Sensor 1, Sensor 2) を特定する。ビート周波数はESAで計測し、ブラッグ波長はWavelength Meterで測定する。Sensor 1, Sensor 2それぞれにおいて温度と歪みの一方を固定して他方を変化させたときのブラッグ波長とビート周波数の値を求めた。

図4が得られた実験結果である。多点型においても単一センサで得られる同様の温度と歪の計測結果を得ることができた。

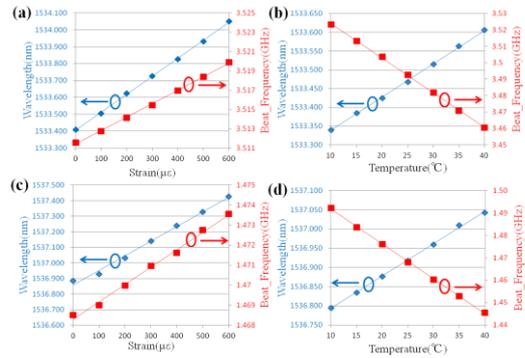


図4 実験結果：センサ①の歪依存性(a)と温度依存性(b)、およびセンサ②の歪依存性(c)と温度依存性(d)

上記の結果から、温度変動の影響を除去した歪を求めることができ、新たな能動型多点化光ファイバ歪センサの構成およびその温度補償手法が確認できる。これによって、今までできなかったナノストレイン歪精度を実現する可能性を提示し、今後地球計測や地震研究用のセンシングネットワークへの展開の基盤を提供している。

一方、上記の研究内容と関連し、高性能の多点センシングシステムを目指して、高歪分解能FBG歪センサの多点化研究を行った。ここでは同一反射波長のFBGセンサからなるシステムについて考える。多点化手法として、光周波数領域リフレクトメトリ(OFDR)方式を用い、光波長を時間掃引した連続光を使用し、干渉光の解析により位置分解を行った。実験で、二組のセンサを多重化した状態で、 10^{-8} の歪分解能を確認している。図5は、実験系と実験結果を示している。

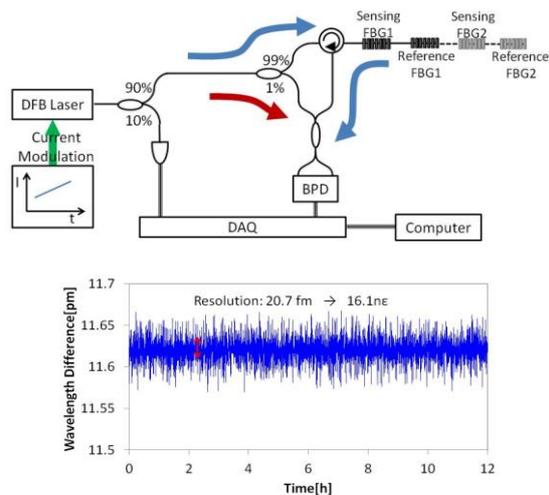


図5 OFDR方式を用いた高歪分解能多重化FBGセンシングシステム実験系(上)と歪分解能の実験結果(下)

さらに、FBG 及び光ファイバ Fabry-Perot 干渉計 (FFPI) を用いた多重化超高感度静的歪センサの検証実験を行い、潮汐と地震による地殻変動の検出に世界で初めて成功した。また、FFPI センサにおいて精密可変ファイバレーザを用いた周波数変調検波手法を提案し、5.8 neの静的歪分解能を実現し、続いて0.05 neの歪分解能をリアルタイムで実証した。図6は、我々のセンサを用いた潮汐による地殻変動(上)および地震(2012年9月14日、千葉北部、M5.1)による地殻変動の記録結果を示す。

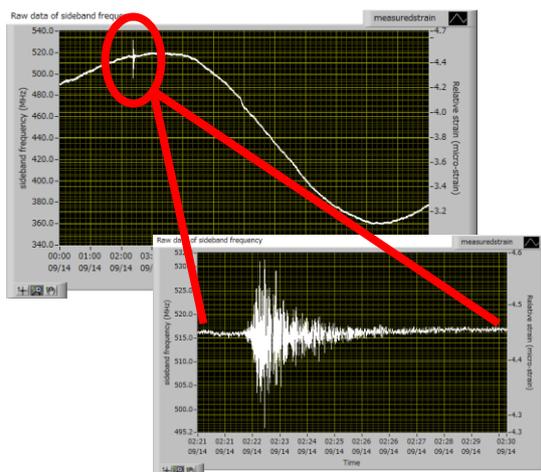


図6 高歪分解能光ファイバセンサを用いて、潮汐による地殻変動(上)および地震(2012年9月14日朝2時22分、千葉北部、M5.1)による地殻変動を記録

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)

- [1] Qingwen Liu, Tomochika Tokunaga, Katsuro Mogi, Hiroya Matsui, Herbert F. Wang, Teruyuki Kato, and Zuyuan He, "Ultra-high resolution multiplexed fiber Bragg grating sensor for crustal strain monitoring," *IEEE Photonics Journal*, Vol. 4, No. 3, pp. 996-1003, Jun. 2012 (査読有)
- [2] Qingwen Liu, Tomochika Tokunaga, and Zuyuan He, "Sub-nano resolution fiber optic static strain sensor using a sideband interrogation technique," *Optics Letters*, Vol. 37, No. 3, pp. 434-436, Feb. 2012 (査読有)
- [3] Qingwen Liu, Tomochika Tokunaga, and Zuyuan He, "Ultra-high-resolution large-dynamic-range optical fiber static strain sensor using Pound-Drever-Hall technique,"

Optics Letters, Vol. 36, No. 20, pp. 4044-4046, Oct. 2011 (査読有)

- [4] Qingwen Liu, Tomochika Tokunaga, and Zuyuan He, "Realization of nano static strain sensing with fiber Bragg gratings interrogated by narrow linewidth tunable lasers," *Optics Express*, Vol. 19, No. 21, pp. 20214-20223, Oct. 2011 (査読有)

[学会発表] (計19件)

- [1] Zuyuan He, Qingwen Liu, and Tomochika Tokunaga, "Development of nano-strain-resolution fiber optic static strain sensor for crustal deformation monitoring," *Asia Communications and Photonics Conference (ACP 2012)*, AS1E.2, Guangzhou, Nov. 2012 (招待講演)
- [2] Zuyuan He, Qingwen Liu, and Tomochika Tokunaga, "Ultra-high-resolution fiber optic quasi-static strain sensors for crustal deformation monitoring," *4th International Symposium on Advances and Trends in Fiber Optics and Applications (ATFO-2012)*, Wuxi, Oct. 2012 (招待講演)
- [3] Zuyuan He, Qingwen Liu, and Tomochika Tokunaga, "Development of nano-strain-resolution fiber optic quasi-static strain sensors for geophysical applications," *22nd International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-22)*, 8421-369, Beijing, Oct. 2012 (招待講演)
- [4] Qingwen Liu, Tomochika Tokunaga, Zuyuan He, "Ultra-high resolution real-time optical fiber strain sensor using a sideband interrogation method," *22nd International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-22)*, 8421-371, Beijing, Oct. 2012 (査読有)
- [5] Zuyuan He, Qingwen Liu, and Tomochika Tokunaga, "Realization of nano-strain-resolution fiber optic static strain sensor for geo-science applications," *CLEO 2012*, CM4B.1, San Jose, May 2012 (招待講演)
- [6] Qingwen Liu, Tomochika Tokunaga, Zuyuan He, "A sideband interrogation method for precise measurement of resonance frequency difference between interferometers," *OFC/NFOEC 2012*, OTu1C.1, Los Angeles, Mar. 4-8, 2012 (査読有)
- [7] Qingwen Liu, Tomochika Tokunaga, Katsuro Mogi, Hiroya Matsui, Herbert F. Wang, Teruyuki Kato, and Zuyuan He, "Field demonstration of 10-nano static strain resolution multiplexed FBG sensor for geophysical applications," *3rd*

- Asia-Pacific Optical Fiber Sensors Conference (APOS 2012)*, Tu-C2, Sydney, Jan. 31-Feb. 3, 2012 (査読有)
- [8] Tomochika Tokunaga, Qingwen Liu, Zuyuan He, K. Mogi, H. Matsui, H. F. Wang, T. Kato, "Application of an ultra-high-resolution FBG strain sensor for crustal deformation measurements at the Aburatsubo Bay, Japan," *2011 American Geophysical Union Fall Meeting*, H13H-07, San Francisco, Dec. 5-9, 2011 (査読有)
- [9] Qingwen Liu, Zuyuan He, Tomochika Tokunaga, and Kazuo Hotate, "Sub-Nano resolution static strain fiber sensor using a novel sideband interrogation technique," *IEEE Photonics Conference 2011*, ThEE 3, Arlington, VA, Oct. 9-13, 2011 (査読有)
- [10] Qingwen Liu, Zuyuan He, Tomochika Tokunaga, and Kazuo Hotate, "An ultra-high-resolution large-dynamic-range fiber optic static strain sensor using Pound-Drever-Hall technique," *CLEO-PR 2011*, 2410-IT-1, Sydney, Aug. 28 - Sept. 1, 2011 (招待講演)
- [11] Qingwen Liu, Zuyuan He, Tomochika Tokunaga, and Kazuo Hotate, "Realization of nano-order static strain resolution in FBG sensors using narrow linewidth tunable laser sources: theoretical analysis," *OFS-21*, 7753-227, Ottawa, May 2011 (査読有)
- [12] 李琳, 劉慶文, 何祖源, 保立和夫, "多点化超高分解能光ファイバ歪センサにおける波長掃引の非線形性補償," 2013年電子情報通信学会総合大会, C-3-61, 岐阜大学, 2013年3月19-22日
- [13] 李琳, 劉慶文, 何祖源, 保立和夫, "OFDRを用いた多点化超高分解能光ファイバ歪センサ," 2012年度電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-13-17, p.316, 富山大学, 2012年9月11-14日
- [14] 松本豪, 関柏鷗, 劉慶文, 保立和夫, 何祖源, "DBRファイバレーザを用いた高精度多点化能動型光ファイバ歪センサ," 応用物理学会第49回光波センシング技術研究会, 東京理科大学, LST-47-25, 2012年6月5-6日
- [15] 松本豪, 関柏鷗, 保立和夫, 何祖源, "DBRファイバレーザを用いた多点化能動型光ファイバセンサ," 2012年電子情報通信学会総合大会, 岡山大学, B-13-34, p.538, 2012年3月20-23日
- [16] 何祖源, 劉慶文, 徳永朋祥, "地殻変動計測のためのナノストレイン分解能光ファイバ歪センサ," 第59回応用物理学関係連合講演会, 早稲田大学, Mar. 15, 2012 (招待講演)
- [17] 劉慶文, 何祖源, 徳永朋祥, 保立和夫, "Pound-Drever-Hall 復調法を用いた超高分解能広ダイナミックレンジ光ファイバ歪センサ," 電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会, 帯広, 信学技報 OFT2011-28, pp. 59-62, 2011年8月25-26日
- [18] 劉慶文, 何祖源, 徳永朋祥, 保立和夫, "Sub-Nano Resolution Optic Fiber Static Strain Sensor Using a Novel Sideband Interrogation Technique," 2011年度電子情報通信学会ソサイエティ大会, 北海道大学, B-13-16, p. 353, 2011年9月13-16日
- [19] 劉慶文, 何祖源, 徳永朋祥, 保立和夫, "波長可変狭線幅レーザを用いた地球物理研究用ナノストレイン分解能 FBG 静的歪センサ," 応用物理学会第47回光波センシング技術研究会, 東京理科大学, LST-47-2, pp. 17-22, 2011年6月14-15日

[その他]
ホームページ等
<http://www.sagnac.t.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 連携研究者

保立和夫 (HOTATE KAZUO)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：60126159

(3) 連携研究者

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