

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2009～2013

課題番号：21226011

研究課題名(和文) 痛みの分かる材料・構造の為に光相関領域法による光ファイバ神経網技術の機能進化

研究課題名(英文) Functional Evolution of Fiber Optic Nerve Systems with Optical Correlation Domain Technique for Structures and Materials that can Feel Pain

研究代表者

保立 和夫 (Hotate, Kazuo)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60126159

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 132,100,000円、(間接経費) 39,630,000円

研究成果の概要(和文)：光周波数の変調で干渉特性を制御し、光ファイバの散乱等を分布測定する独自技術「光相関領域法」の機能進化を果たした。本「光ファイバ神経網」を橋や航空機等に巡らせ、歪や温度を分布測定し「痛みの分かる材料・構造」を実現する。他手法を凌ぐ、mm分解能、kHz測定速度、ランダムアクセス等を実現してきた。本研究では、ブリルアン散乱による、歪と温度の同時測定、分布情報全体の高速測定、ランダムアクセスの高速化等の機能進化を果たし、空間分解能、測定レンジ、雑音特性等も向上させた。光ファイバグレーティングによる短尺分布型センサの多重化技術も提案・実証した。航空機の健全性診断等の応用研究も進め、適用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：Functions of original "optical correlation domain techniques" have been evolved, which realizes distributed sensing of properties along optical fibers, such as scattering, by manipulating interference characteristics by laser frequency modulation. By embedding the "fiber optic nerves" along structures, for example bridges, "structures that can feel pain" can be realized. Our techniques had demonstrated superior functions, such as mm resolution, kHz speed, and random accessibility. In this project, we have evolved the functions to realize simultaneous sensing of strain and temperature, high speed acquisition of whole distributed data, and high speed random accessibility. Spatial resolution, sensing range, and noise characteristics have also been improved. Multiplexing of short-length distributed sensors or fiber Bragg gratings has also been proposed and demonstrated. Applications, including structural health monitoring for aircrafts, have been studied to prove the applicability.

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：計測システム 光ファイバセンサ スマート材料構造 分布型センシング

1. 研究開始当初の背景

光ファイバに沿う歪や温度の情報を伝搬光の属性から分布測定する「光ファイバ神経網」を、ビル、橋、航空機翼等に張り巡らせることで「痛みの分かる材料・構造」を実現する研究が活発である。しかし、従来開発されてきた光パルスを入射してその後方散乱を時間分解測定するという「時間領域法」などでは、空間分解能や測定時間等が不十分であった。

これに対し研究代表者らは、光源の周波数や光波位相等を変調して干渉特性を任意に合成する「光相関領域法」を発明し、従来技術を凌ぐ性能を発現できる種々の「光ファイバ神経網」を提案・開発し、mm オーダの空間分解能、kHz のサンプリング速度、ランダムアクセス性等の機能を達成していた。

2. 研究の目的

本研究では、一本の光ファイバでの歪と温度の高精度・同時・分布計測や、分布情報全体の動的測定等、より高次の機能を独自の新手法にて実現し、「光ファイバ神経網」に「機能進化」をもたらすことを目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、以下の4つのサブテーマを併進させた。

- (1) BOCDA 法の機能進化
  - ① 温度と歪の高精度・同時・分布計測技術
  - ② 分布情報全体のダイナミック測定
- (2) ブリルアン散乱歪センシングのシステム構成の進化
  - ① BOCDA 法の高機能化
  - ② S-BOCDA 法の機能進化
- (3) 長尺 FBG 歪センシングシステムの機能進化
- (4) 進化した痛みの分かる材料・構造の実証実験

4. 研究成果

上記の各サブテーマに関する研究成果を以下に述べる。

- (1) BOCDA 法の機能進化
  - ① 温度と歪の高精度・同時・分布計測技術
 

偏波維持光ファイバの一方の偏波モードにポンプ光とプローブ光を伝搬させて誘導ブリルアン散乱を起こした際に生じている強い超音波回折格子が、直交直線偏波をもブラッグ反射させることを当研究グループが初めて実証し、ブリルアンダイナミックグレーティング (BDG) と名付けた。ここで得られるブリルアン周波数シフト (BFS) と BDG の反射周波数シフト (BDG シフト) から、温度と歪の分布を高精度に同時に取得する技術も、当研究室が提案した。

本研究では、単一レーザで駆動できる安定システムを提案・構築し、出力の安定性を向上させた。図1は、そのシステム構成であり、

図2は、(a)がブリルアン光相関領域解析法 (BOCDA 法) により得られた BFS と BDG シフトの分布、(b)が両量の温度と歪依存性から計算された温度と歪の同時・分離・分布計測結果である。本技術に関しては、さらに時間ゲート法を適用した測定レンジの延伸技術も提案・実証し、500m を達成した。さらに、BDG スペクトルを BOCDA 系で分布測定する際の空間分解能の劣化要因を突き止め、光源に強度変調を施すことでこれを解決する技術を提案できた。当初計画にない本新技術により、分解能を 4.5 倍改善するができた。このように本技術の機能進化が図られた。

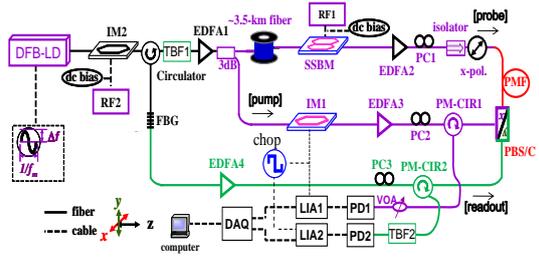


図1 単一レーザ駆動で温度と歪の同時・分離・分布測定を可能にした BOCDA システム

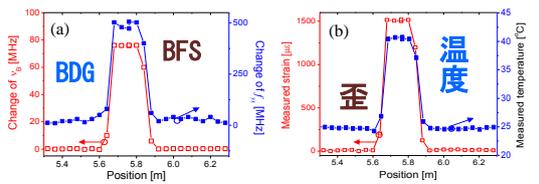


図2 図1のシステムによる温度と歪の分離・分布測定結果

- ② 分布情報全体のダイナミック測定
 

BOCDA 法の特徴のひとつに、「ランダムアクセス測定」が可能なのが挙げられる。つまり、分布測定系でありながら、光ファイバに沿う任意の複数点を選定し、これらの点での動的な歪を時間分解測定できる。これは、時間領域法では実現できない本手法のユニークな機能である。本研究では、この機能進化も図った。本モードでの測定速度の制限要因は BGS を描く際にポンプ光とプローブ光の周波数差を 10GHz 近辺で掃引する時間であった。これを高速化するためにマイクロ波発生に電圧制御発振器 (VCO) を導入してその他の系のパラメータも最適化した。図3は新たな BOCDA システム、図4は従来速度を 2.5 倍向上して 500 測定/秒にて任意の2点でランダムアクセス測定を実施したデータである。本報告書提出時現在、5,000 測定/秒も実現されている。

ランダムアクセスモードではなく、光ファイバに沿う分布情報全体をより高速に測定したいとの要求もある。そこで本研究では、ポンプ・プローブ周波数差を固定して光ファイバに沿うブリルアンゲインを測定し、上記周波数差を順次変化させつつ全分布情報を得る「光軸方向掃引方式 BOCDA 法」も提案し

た。既に 12 分布/秒まで高速化できている。後述する S-BOCDA 系を基盤としたシステムでは、20 分布/秒も達成した。

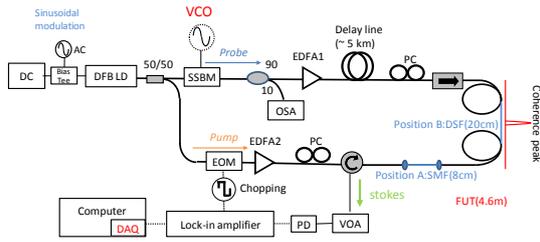


図3 ランダムアクセス速度を向上した BOCDA システム

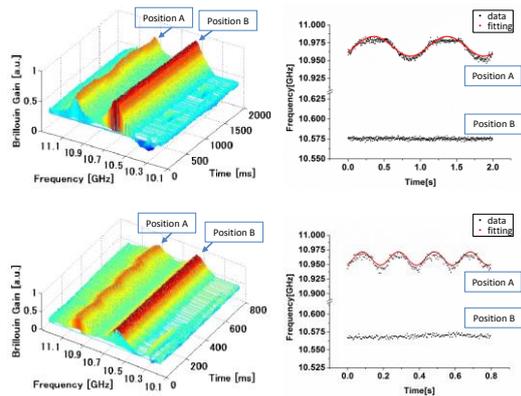


図4 500 測定/秒のランダムアクセス速度

(2) ブリルアン散乱歪センシングのシステム構成の進化

① BOCDR 法の高機能化

光ファイバ中で生じる後方自然ブリルアン散乱を信号光とする干渉計において、光源周波数を正弦波変調することで位置選択的にブリルアン散乱を測定する独自発明の BOCDR 法では、空間分解能向上 (6mm)、測定レンジ延伸 (1000m 超)、偏波特性安定化、光ファイバ複屈折評価法を実現し、本システム原理を表現する理論式も導出した。

さらに、光源周波数変調に同期した強度変調を導入することで背景光雑音スペクトル成分を抑圧し、空間分解能の向上と歪測定でのダイナミックレンジの拡大を両立させる新機能を実証した。図5は、本技術の原理である。光源の周波数変調で相関ピーク (測定点) を形成する際にその前後に生じるサイドローブが背景光雑音の原因であり、強度変調の導入によりサイドローブが抑圧できる結果、雑音が低減できる。図6は、本雑音低減原理を確認した実験結果 (上図) とここで開発したシミュレーションによる理論計算 (下図) である。富士山型の雑音スペクトルが低減されている。図7は、本技術により達成された 10mm の空間分解能と 7,000 $\mu\text{e}$  の歪ダイナミックレンジを示している。

また、参照光に位相変調を施した場合の測定スペクトルと施さない場合のそれとの差をとることで、背景光雑音が抑圧可能であることを BOCDR 系において初めて実証した。当

初計画にはなかった本提案も、BOCDA 法の機能向上に大きく貢献することが期待できる。

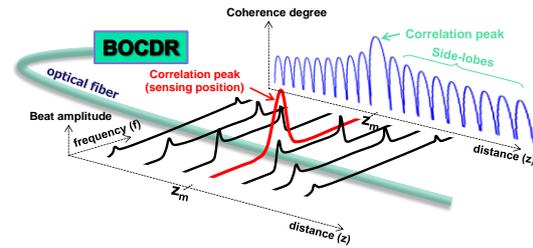


図5 BOCDR における背景光雑音スペクトル

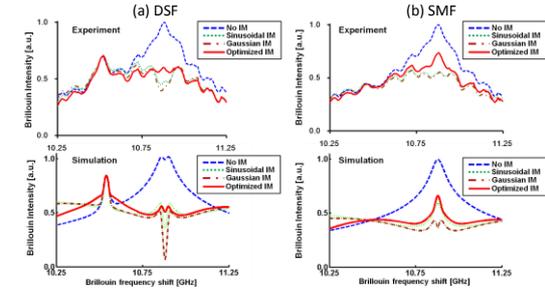


図6 強度変調による背景光雑音の抑圧効果。上図：実験、下図：シミュレーション

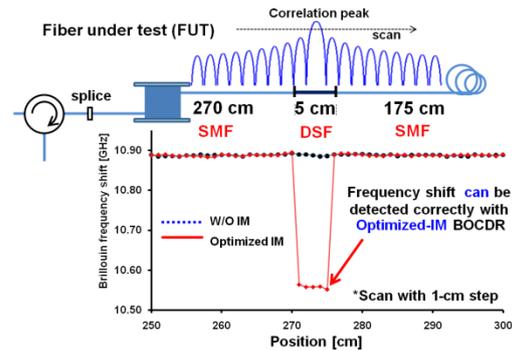


図7 強度変調法による 10 mm 空間分解能と 7,000 $\mu\text{e}$  歪ダイナミックレンジの達成

② S-BOCDA 法の機能進化

ポンプ光とプローブ光の周波数差を、半導体レーザ (LD) の直接 FM 特性によって、矩形電流波形注入により時分割発生させる S-BOCDA 法により、高速なランダムアクセス測定を目指して新たな系を構築し、200 測定/秒でのランダムアクセスを実現して任意 4ヶ所で同時・動的歪計測にも成功した。S-BOCDA による温度と歪の同時・分離・分離測定系も考案した。当初計画にはなかった本システムでは、LD の直接 FM でポンプ、プローブ、読み出しの 3つの異なる光周波数を時分割発生させ、それぞれの周波数差を掃引できる新技術を提案・実現して、温度と歪の同時測定に成功した。

S-BOCDA 法で分布情報全体を高速測定する新システム構成も発案した。位置選択的に誘導散乱を起すための光源周波数変調をポンプ・プローブ光に若干異なる周波数で加えることで、測定位置を光ファイバに沿って自動掃引することを可能にした。これも当初計画

にはなかった画期的な新技術である。本掃引速度は自由に設定でき、電子機器に負荷を掛けずに十分な高速測定が可能となった。図8にシステム構成を示す。図9のように、100m測定レンジと80cm空間分解能で20分布/秒の分布情報全体の高速測定を実現した。これは、世界最速の全分布量測定と言える。

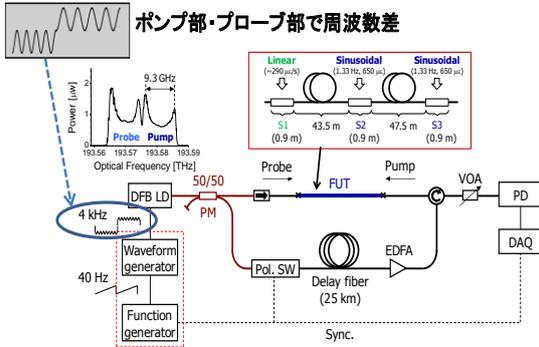


図8 測定位置自動掃引方式 S-BOCDA 系

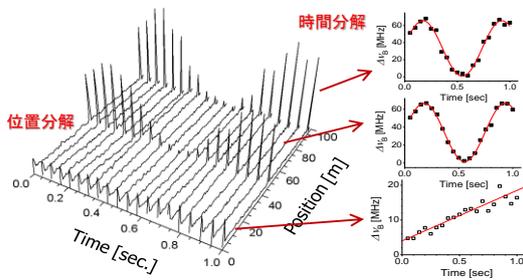


図9 分布情報全体の高速測定結果

### (3) 長尺 FBG 歪センシングシステムの機能進化

複数の長尺 (10cm) FBG を多点配置できるシステム構成を提案した。相関領域法により FBG 反射光と参照光との干渉を制御し、一つの長尺 FBG 内のある点からの反射スペクトルを空間分解能 10 mm で分布測定でき、准分布型センシングを提供する。高速測定化 (1000 サンプル/秒)、測定レンジ延伸、FBG 間クロストーク低減、空間分解能向上法 (6mm の達成) 等の機能進化を果たした。図 10 にシステム構成を、図 11 に准分布型 FBG センサ多点化の実証結果を示す。

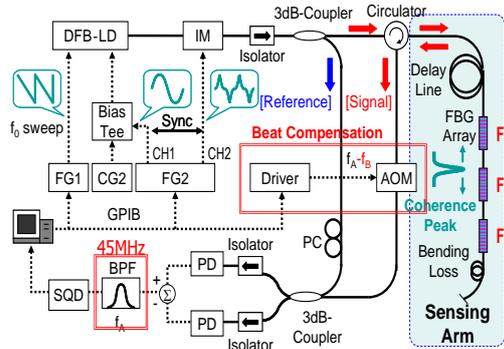


図10 准分布型 FBG センサを多点化するシステム構成

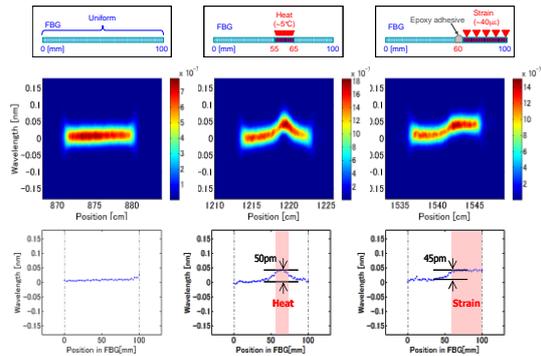


図11 3つの FBG センサの多点化実験

### (4) 進化した痛みの分かる材料・構造の実証実験

本研究費にて機能進化を図ってきた独自の技術を企業等との共同研究によって実用化する努力も続けてきた。BOCDA の航空機ヘルスマニタリングへの応用を目的に、航空機メーカ、計測器メーカと共同研究を進め、温度と歪の同時測定系の試作や機体への実装研究等を進めた。既に 2 回の実機飛行試験を行い、BOCDA 法や温度と歪の同時測定法が航空機の診断技術として有望であることが確認できた。本学航空学科とは、航空機用 CFRP 材料のボルト接合部分の引っ張りによる劣化を、BOCDA の mm オーダの空間分解能を活かして診断することにも成功した。

プラント診断に BOCDA を適用する基礎研究も実施した。BOCDA の高空間分解能性を活用してガラス系 PLC 光集積回路の診断にも成功した。図 12 は、PLC 光集積回路サンプル、図 13 は 5.6 mm 分解能で測定した PLC 内の BFS 分布である。光回路の形状に良く対応した BFS 分布の取得に成功している。

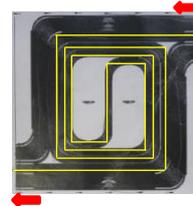


図12 PLC 光導波路サンプル

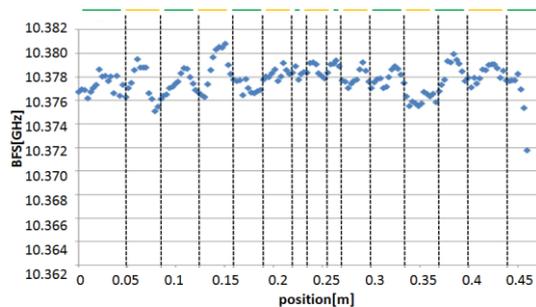


図13 導波路形状に良く対応した BFS 分布の測定結果

以上のように当初計画は順調に進展して成果を蓄積できた。加えて、当初計画にはな

かった新技術の発案、新機能の発現も果たせて、目標を超える進展が図られたと考える。

このような状況を勘案して、新たな発案の研究を加速するために、「最終年度前年度申請」制度により、新たな基盤研究 (S) を申請して採択して頂いた。本報告書提出時現在、この新しい基盤研究 (S) にて、本技術全体の学術基盤の確立を目指している。

本研究期間中の発表は次項に示す通りであるが、3編の招待論文、26件の国際会議招待講演、7編の解説記事を発表している。

また、代表者は、本研究開始以降、下記の2件の賞を受けている。また、本研究に参画した院生は、合計9件の賞を受賞している。

- ① SPIE DSS Lifetime Achievement Award, Kazuo Hotate, "Fiber Optic Nerve Systems for Safety and Security" 2009年4月15日.
- ② 応用物理学会第15回光・量子エレクトロニクス業績賞 (宅間宏賞), 保立和夫, "光ファイバーセンシングに関する先駆的・独創的研究" 2014年3月17日.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計44件) 全件査読付論文

- ① R. K. Yamashita, Z. He and K. Hotate: "Spatial resolution improvement in correlation domain distributed measurement of Brillouin grating," IEEE Photonics Technology Letters, 26(5), pp. 473-476, 2014.  
DOI: 10.1109/LPT.2013.2297168
- ② K. Hotate: "Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques," Optical Fiber Technology (Elsevier Inc.), 19(6), Part B, pp. 700-719, 2013. <Invited>  
DOI: 10.1016/j.yofte.2013.08.008
- ③ K. Hotate, W. Zou, R. K. Yamashita and Z. He: "Distributed discrimination of strain and temperature based on Brillouin dynamic grating in an optical fiber," Photonic Sensors, 3(4), pp. 332-344, 2013. <Invited>  
DOI: 10.1007/s13320-013-0130-7
- ④ R. K. Yamashita, W. Zou, Z. He and K. Hotate: "Measurement range elongation based on temporal gating in Brillouin optical correlation domain distributed simultaneous sensing of strain and temperature," IEEE Photonics Technology Letters, 24(12), pp. 1006-1008, 2012.  
DOI: 10.1109/LPT.2012.2192725
- ⑤ K. Kajiwara and K. Hotate: "Multiplexing of long-length fiber Bragg grating distributed sensors based on synthesis of optical coherence function," IEEE Photonics Technology Letters, 23(21), pp. 1555-1557, 2011.  
DOI: 10.1109/LPT.2011.2163703
- ⑥ K.-Y. Song, M. Kishi, Z. He and K. Hotate: "High-repetition-rate distributed Brillouin sensor based on optical correlation-domain analysis with differential frequency modulation," OSA Optics Letters, 36(11), pp. 2062-2064, 2011.  
DOI: 10.1364/OL.36.002062
- ⑦ W. Zou, Z. He and K. Hotate: "One-laser-based generation/detection of Brillouin dynamic grating and its application to distributed discrimination of strain and temperature," OSA Optics Express, 19(3), pp. 2363-2370, 2011.  
DOI: 10.1364/OE.19.002363
- ⑧ Y. Mizuno, W. Zou, Z. He, and K. Hotate: "Operation of Brillouin optical correlation-domain reflectometry: theoretical analysis and experimental validation" IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 28(22), pp. 3300-3306, 2010.  
DOI: 10.1109/JLT.2010.2081348
- ⑨ W. Zou, Z. He, and K. Hotate: "Demonstration of Brillouin distributed discrimination of strain and temperature using a polarization-maintaining optical fiber," IEEE Photonics Technology Letters, 22(8), pp. 526-528, 2010.  
DOI: 10.1109/LPT.2010.2041922
- ⑩ Y. Mizuno, Z. He and K. Hotate: "Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on double-modulation scheme," OSA Optics Express, 18(6), pp. 5926-5933, 2010.  
DOI: 10.1364/OE.18.005926
- ⑪ K. Kajiwara and K. Hotate: "Measurement of Bragg-wavelength distribution in a long-length fiber Bragg grating with high speed sampling," Applied Physics Express, 2(8), pp. 082401.1-3, 2009.  
DOI: 10.1143/APEX.2.082401
- ⑫ W. Zou, Z. He, K.-Y. Song and K. Hotate: "Correlation-based distributed measurement of a dynamic grating spectrum generated in stimulated Brillouin scattering in a polarization-maintaining optical fiber," OSA Optics Letters, 34(7), pp. 1126-1128, 2009.  
DOI: 10.1364/OL.34.001126
- ⑬ Y. Mizuno, Z. He and K. Hotate: "One-end-access high-speed distributed strain measurement with 13-mm spatial resolution based on Brillouin

optical correlation-domain reflectometry,” IEEE Photonics Technology Letters, 21(7), pp. 474-476, 2009.  
DOI: 10.1109/LPT.2009.2013643

[学会発表] (国際会議発表 計69件)  
うち招待講演 (26件)

- ① K. Hotate: “Fiber Brillouin Distributed Sensing as Fiber Optic Nerve Systems,” The 4th Asia-Pacific Optical Sensors Conference 2013 (APOS2013), Wuhan (China), Oct. 17, 2013. <Keynote>
- ② K. Hotate: “Brillouin Optical Correlation Domain Distributed Fiber Sensors,” OSA’s 97th Annual Meeting Frontiers in Optics 2013 (FIO/LS 2013), FW11.1, Orlando, Oct. 9, 2013 <Invited>.
- ③ K. Hotate: “Fiber Optic nerve systems for smart structures and smart materials with optical correlation domain technologies,” The 10th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, Kyoto, July 4, 2013 <Invited>.
- ④ K. Hotate: “Distributed and Multiplexed Optical Sensing by Synthesis of Optical Coherence Function,” OFC/NFOEC 2012, Los Angeles, March 6, 2012 <Invited>.
- ⑤ K. Hotate: “Brillouin scattering accompanied by acoustic grating in an optical fiber and applications in fiber distributed sensing,” 21th International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS-21), Ottawa, May 16, 2011 <Invited>.
- ⑥ K. Hotate: “Fiber Optic Nerve Systems for Secure and Safety Society,” APOS’ 2010, Guangzhou, June 28, 2010 <Keynote>.
- ⑦ K. Hotate: “Fiber optic nerve systems for smart materials and smart structures,” OSA Topical Meeting -Optical Sensors-, Karlsruhe, June 23, 2010 <Invited>.
- ⑧ K. Hotate: “Fiber optic nerve systems for safety and security,” SPIE DDS Conference, Orlando, April 15, 2009 <Keynote> <Invited>.

[図書] (計4件)

- ① 保立和夫: “構造物モニタリング技術の開発と応用 (板生 清 監修): 第2章 センサ技術 2 光ファイバによる構造物センシング,” pp. 62-73, 株式会社シーエムシー出版, Oct. 2013.
- ② 保立和夫, 村山英晶 監修: “光ファイバセンサ入門 –これから光ファイバセンサをはじめの方必携–,” 光防災センシング振興協会, 293, Apr. 24, 2012.

- ③ K. Hotate: “Fiber Optic Nerve Systems for Smart Materials and Smart Structures, (A Chapter in “Polymer Photonics, and Novel Optical Techniques,” ed. By Y. Kawabe and M. Kawase)” PWC Publishing Photonics world Consortium, pp.83-90, Mar. 2011.

[産業財産権]

○出願状況 (計9件)

名称: 光ファイバ特性測定装置及び光ファイバ特性測定方法  
発明者: 保立和夫, 山下ケンジ ホドリゴ, 何 祖源  
権利者: 国立大学法人東京大学  
種類: 特許  
番号: 特許願 2012-187003 号  
出願年月日: 24年8月27日  
国内外の別: 国内

○取得状況 (計10件)

名称: Optical-fiber-characteristic measuring device and optical-fiber-characteristic measuring method  
発明者: K. Hotate, K.-Y. Song and Z. He  
権利者: The University of Tokyo, Yokogawa Electric Corporation  
種類: 特許  
番号: US7,948,614B2  
取得年月日: 23年5月24日  
国内外の別: 国外

[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

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

### (2) 連携研究者

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  
(平成24年8月まで連携研究者)

山下 真司 (YAMASHITA, Shinji)  
東京大学・先端科学技術研究センター・教授  
研究者番号: 40239968

岸 眞人 (KISHI, Masato)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号: 00150285