

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月17日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2018

課題番号：17K14692

研究課題名(和文)光ファイバを用いた外部音響インピーダンスの分布センシング

研究課題名(英文)Distributed acoustic impedance sensing using optical fibers

研究代表者

林 寧生 (Hayashi, Neisei)

東京大学・先端科学技術研究センター・特別研究員

研究者番号：90786683

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：石油採掘中における石油成分特定や血管内病変細胞の直接検出への応用可能性がある分布型音響インピーダンスセンサの基礎研究を行った。第一に、光ファイバ中の導波型音響波ブリルアン散乱(GAWBS)の線幅が光ファイバ外部の物質の音響インピーダンスから受ける変化を調査した。第二に、GAWBSの信号対雑音比向上のために高非線形ファイバ中のGAWBSの挙動を調査した。第三に、GAWBSを用いて光ファイバ上の温度分布の測定と外部音響インピーダンスの分布測定を実証した。第四に、特殊ファイバ中のGAWBSの観測を行い、その特性について議論した。第五に、ブリルアンロスを用いたGAWBSの完全な局在化手法の提案をした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ブリルアン散乱に基づく分布型光ファイバセンサで取得できる物理量に音響インピーダンスを追加した。これにより、このセンサの学術的研究分野の拡大に貢献する。また、これに伴い、このセンサの応用先として、従来のインフラのみならず、早期癌検出等の医療分野や油田における産出オイルの種類特定等の社会的応用に役立つと考えられる。さらに、音響導波型ブリルアン散乱光を用いたマルチコアファイバ上での情報操作という新たなコンセプトを提案した。

研究成果の概要(英文)：I investigated the distributed external acoustic impedance sensing based on correlation-domain technique for the oil inspection of underground and cancer detection. First, I measured acoustic impedance dependence of linewidth of guided-acoustic wave Brillouin scattering (GAWBS). Second, I observed the enhanced GAWBS in highly nonlinear optical fibers using pump-probe technique for signal-to-noise ratio improvement. Third, I demonstrated the distributed temperature/acoustic impedance sensing based on GAWBS using Brillouin optical correlation-domain technique. Fourth, I observed GAWBS in special optical fibers. Fifth, I proposed the method for long-term localization of GAWBS in optical fiber.

研究分野：非線形光学

キーワード：光ファイバ ブリルアン散乱 分布測定

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

光ファイバには細径・防爆性・耐電磁性等という特徴があり、光ファイバ中の非線形現象を用いた様々なセンサが開発されている。光ファイバ中の非線形現象の一つである導波音響波型ブリルアン散乱(GAWBS)は、光ファイバの径方向に発生する音響波による光の前方散乱である[1]。この散乱光は起因する音響波の振動モードによって二つに大別される。一つはコア中心から放射状に伝播する音響波($R_{0,m}$)により散乱されるポラライズド GAWBS、もう一つは、光ファイバを横から握りつぶしたような振動を生じる音響波($TR_{2,m}$)により散乱されるデポラライズド GAWBS である。しかし、これらの GAWBS の応用研究は盛んに行われていなかった。理由として、GAWBS を用いて取得されている物理量が歪みと温度のみであったためである。これらの物理量は、通常の長手方向に伝播する音響波により生じるブリルアン散乱光を用いても取得可能である。

近年、ポラライズド GAWBS を用いた音響インピーダンスセンシングが示された[2]。これは、 $R_{0,m}$ モードの音響波の強度が光ファイバのクラッドと外部物質の間で生じる反射損失に依存することを原理とする。この反射損失は、ファイバ内部の既知の音響インピーダンスとファイバ外部の未知の音響インピーダンスのみによって決定されるため、外部の音響インピーダンスを計算で求めることができる。このセンサシステムの欠点は、被測定ファイバがリング構成となっており、従来の分布測定手法の適用が困難なことである。もし光ファイバで音響インピーダンスが分布測定できれば、(1) 従来のように外部から振動を印加しなくても石油掘削時に光ファイバ一本で石油層を見つけることが可能となる[3]。また、(2) カテーテルに搭載し、血管内の病変細胞(通常細胞と音響インピーダンスが異なる[4])を検出することも可能となる。さらには、(3) 日本の重力波検出器である KAGRA の真空ダクト内の分布型真空度(空気濃度)のセンシング・(4) 広域農場での分布型水分センシング・(5) 光ファイバを特殊メッキすることにより広範囲の電波/磁場分布型センサへの応用可能性もある。

[1] R. M. Shelby et al., *Phys. Rev. B* 31 (1985) 5244.

[2] Y. Antman et al., *Optica* 3 (2016) 510.

[3] Schlumberger Limited., Schlumberger Educational Services (1991).

[4] Y. Kato et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* 53 (2014) 07KF05.

2. 研究の目的

そこで、我々は上記の問題を解決し光ファイバを用いた音響インピーダンスの分布測定システムを構築すること最終目標とする。

3. 研究の方法

研究の方法・段階は、以下の9段階に区分した。第一段階として、光ファイバ中の GAWBS の線幅が光ファイバ外部の物質の音響インピーダンスにどのような変化を受けるのかを調査する。第二段階として、GAWBS の SNR 向上のために非線形ファイバ中の GAWBS の挙動を調査する。第三段階として、その SNR の高い GAWBS を用いて光ファイバ上の温度分布の測定を実証する。第四段階として、同システムを用いて光ファイバ外の音響インピーダンスの分布測定を実証する。第五段階として、同システムの温度測定機能を向上させるために、伝搬損失が少なく温度依存性の高いファイバを選定しその特性を評価する。第六段階として、同システムの外部音響インピーダンス測定機能を向上させるために、音響インピーダンスの測定に適したファイバを提案・開発する。第七段階として、次世代通信ファイバであるマルチコアファイバ中の GAWBS の観測を行い、その特性について議論する。第八段階として、ブリルアンロスを用いた GAWBS の完全な局在化手法の提案をする。第九段階として、ファイバの敷設時に必要となる高精度ライダの開発を行う。

4. 研究成果

① 光ファイバ中の GAWBS の線幅の外部音響インピーダンスの依存性の測定[J5]

光ファイバ中の GAWBS の線幅は、光ファイバ外部の物質によって変化することが知られている。しかし、その依存性は測定されていなかった。そこで、光ファイバの被覆を完全に除去し、濃度の異なるスクラロース溶液に浸すことで、その依存性を測定した。測定結果を Fig. 1.1 に示す。線幅の外部音響インピーダンス依存性は、 $0.16 \text{ [MHz/kg/s} \cdot \text{mm}^2]$ であった。よって、この依存性を用いれば、外部音響インピーダンスを線幅から測定することができる。

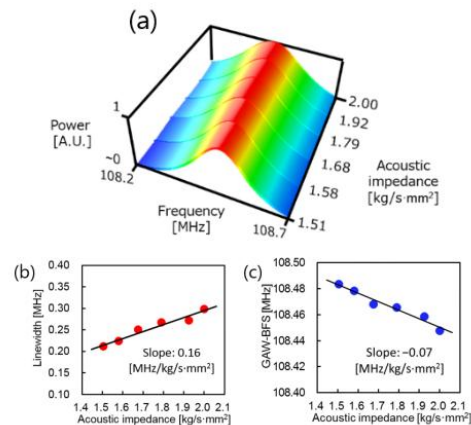


Fig.1.1. Measured acoustic impedance dependences of (a) depolarized GAWBS spectrum, (b) its linewidth, and (c) its central frequency.

② ポンプ・プローブ法を用いた高非線形ファイバ中の増強 GAWBS の観測とその特性評価[J1,C10]

一般に、GAWBS の SNR は小さく、測定時間の増大が懸念される。SNR を高める手法として前方ポンプ・プローブ法を用いた増幅方法が提案されているが、後方ポンプ・プローブ法は提案されていない。そこで、後方ポンプ・プローブ法を提案し、その実証を行った。実験系を Fig. 2.1 に示す。実験結果を Fig. 2.2 に示す。被測定ファイバとして、高非線形ファイバ (HNLf) を使用した。Fig. 2.2(b) より、本手法でも GAWBS が観測でき、さらに自然 GAWBS と比較して、5 dB の SNR 向上に成功した。我々は、この増強された GAWBS に Enhanced FBS (/GAWBS) と名付けた。この成果は、GAWBS の分布測定に貢献する。

③ GAWBS を用いたファイバ上の温度の分布測定[C1]

2004 年に田中氏により、FBS(/GAWBS) の分布測定のコネプトが提示された。これは、FBS を後方散乱にカップリングさせて観測するという提案である。2018 年に音響インピーダンスの分布測定が実証された。これは、FSBS でレイリー散乱光を変調することで、FSBS の線幅を分布的に測定する光時間領域反射計 (OTDR) である。しかし、パルス光をポンプ光として使用するため、ランダムアクセスと高サンプリングレートの実現が困難である。これを解決するには、光相関領域法が適している。しかしこの手法を適用するには、連続光の対向伝搬ポンプ・プローブ法を適用する必要がある。近年、我々は、Enhanced FBS (EFBS) を後方誘導ブリルアン散乱光 (BSBS) をシードとして観測する手法を提案し、その実証を行った [C3]。これは、連続光の対向伝搬ポンプ・プローブによる EFBS の発生を可能とする。

そこで、光ファイバ上の温度分布を EFBS に基づく光相関領域法で分布測定を実証する。EFBS に基づく分布測定の実証を行った。使用した被測定ファイバの構成を Fig. 3.1 に、実験系を Fig. 3.2 に示す。ポンプパワーは 17 dBm、プローブパワーは 3.0 dBm である。ESA の中心周波数は 942.28 MHz とした。これは、 $R_{0,19}$ モードの共振周波数シフト量に相当する。ヒーターの温度は 60°C とした。Fig. 3.3 に EFBS のブリルアン利得スペクトル (BGS) の分布図を示す。BGS パワーは規格化した。Fig. 3.3(a) より EFBS スペクトルの分布が光相関領域法により測定可能であることが示された。Fig. 3.3(b) に EFBS-BFS の温度変化部のピークの中心周波数は 946.16 MHz であった。EFBS-FBS 量は 3.88 MHz であり、これは、文献 [J4] においての 35°C の温度変化に一致する [J4]。以上より、EFBS に基づく光相関領域法を用いた温度の分布測定に成功した。

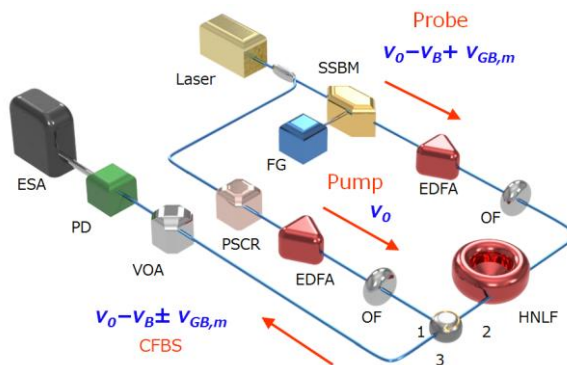


Fig. 2.1. Schematic setup used to observe the enhanced forward Brillouin scattering (EFBS) using backward stimulated Brillouin scattering (BSBS) as seed. EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, FG: function generator, HNLf: highly nonlinear fiber, OF: optical filter, PD: photodetector, PSCR: polarization scrambler, SSBM: single-sideband frequency modulator; VOA: variable optical attenuator.

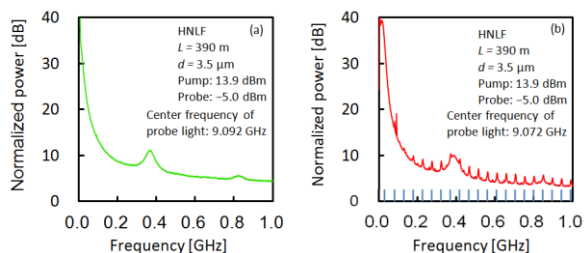


Fig. 2.2. (a) Wide-range view of the spectrum when the center frequency of the probe light was set to the Brillouin frequency shift (BFS). (b) Wide-range view of the observed EFBS spectrum (red), and theoretical center frequencies of $R_{0,m}$ (blue).

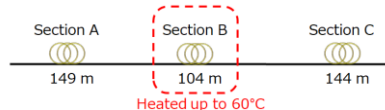


Fig. 3.1. FUT configuration.

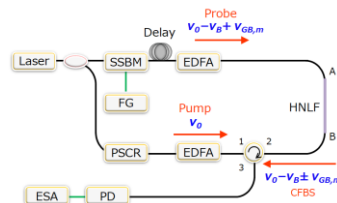


Fig. 3.2. Schematic setup for correlation-domain analysis based on EFBS seeded by BSBS. EDFA, erbium-doped fiber amplifier; ESA, electrical spectrum analyzer; FG, function generator; PD, photo detector; PSCR, polarization scrambler; SSBM, single side-band modulator.

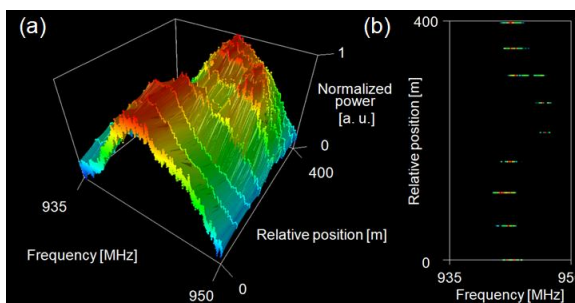


Fig. 3.3. (a) Measured EFBS-BGS distribution and (b) Measured EFBS-BFS distribution.

Fig. 3.3(b) に EFBS-BFS の温度変化部のピークの中心周波数は 946.16 MHz であった。EFBS-FBS 量は 3.88 MHz であり、これは、文献 [J4] においての 35°C の温度変化に一致する [J4]。以上より、EFBS に基づく光相関領域法を用いた温度の分布測定に成功した。

④ ファイバ外の音響インピーダンスの分布測定[C4]

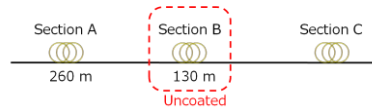


Fig. 4.1. FUT configuration.

Fig. 4.1.のように一部の被覆を除去した FUT を作製し、GAWBS の線幅を分布測定した。結果を Fig. 4.2.に示す。被覆を除去した区間の線幅は 4.5 MHz であり、これは、外物質が空気であった場合の線幅に一致する[J3]。

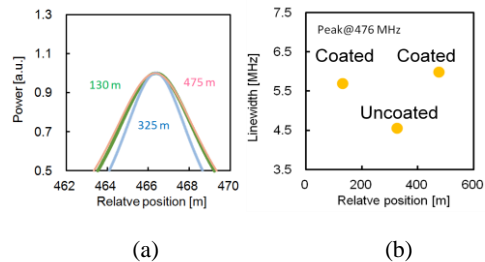


Fig. 4.2. (a) Measured distributed linewidth

⑤ 温度感度の向上[J4]

GAWBS の Brillouin 周波数シフトの温度感度が高いファイバとして、小径フォトニック結晶ファイバ(SC-PCF)ある。このファイバは、GAWBS の共振ピークが 1.2 GHz まで広がっておりこれにより、100 kHz/K という温度依存係数を得ている。しかし、伝搬損失が 5.4 dB/km あり、将来的に分布測定システムに使用するのが困難である。これを解決するために、伝搬損失が SC-PCF より小さくさらに、GAWBS の共振ピークが 2 GHz まで広がっている HNLF を使用することを提案した。HNLF の温度係数は、依存性は線形であり、その依存係数は、168 kHz/K であった。これは、SC-PCF の温度依存係数の 1.7 倍であった。この結果は、将来、GAWBS を用いた分布型高感度温度センサの開発に貢献する。

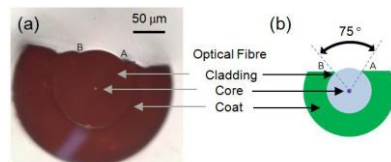


Fig. 6.1. Cross-sectional area of the PUF: (a) microscopy image and (b) schematic structure.

⑥ 音響インピーダンス測定用ファイバの強度向上[J3]

外部音響インピーダンスを測定する場合、光ファイバの被覆を除去する必要がある。従来、この被覆をすべて除去していたため、その強度が極端に低下していた。この点を解決するために、一部分の被覆のみを除去した部分被覆除去ファイバ(PUF)を作製し、その PUF 中の GAWBS を観測した後、その特性を評価した。実験で使用したファイバの断面図を Fig. 6.1 に示す。実験結果を Fig. 6.2 に示す。PUF の線幅は、被覆ありファイバよりも 0.614 MHz 小さかった。よってこの差を用いれば、音響インピーダンスセンシングが可能となると考えられる。

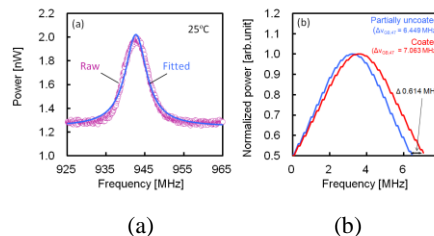


Fig. 6.2. (a) Measured GAWBS spectrum in the PUF. (b) Normalized GAWBS spectrum in PUF and that in coated fibre.

⑦ マルチコアファイバ(MCF)のサイドコア中の GAWBS の観測[J2]

次世代通信網に使用される MCF 中のサイドコア中の自然 GAWBS は観測されていない。そこで、この MCF 中のサイドコア(Fig. 7.1)中の GAWBS を観測した。観測したスペクトルを Fig. 7.2 に示す。GAWBS の共振帯域は、400 MHz でありこれは、センターコア中の GAWBS の 2 分の 1 であった。また、サイドコア中の GAWBS には、センターコア中の GAWBS には存在しない共振ピークが存在していた。これは、将来、周方向の分解能を持つ分布型光ファイバの開発に役立つ。また、センターコアとサイドコアの両コアに光を入射した場合、自然 GAWBS 同士の相互作用がないことを証明した。一方、Prof. A. Zadok により、MCF 中のセンターコアとサイドコアの誘導 GAWBS 同士に相互作用(XPM: 相互位相変調)があることが示された。これに

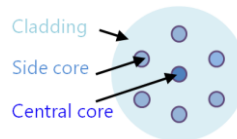


Fig. 7.1. Cross section of the multi-core fiber under test.

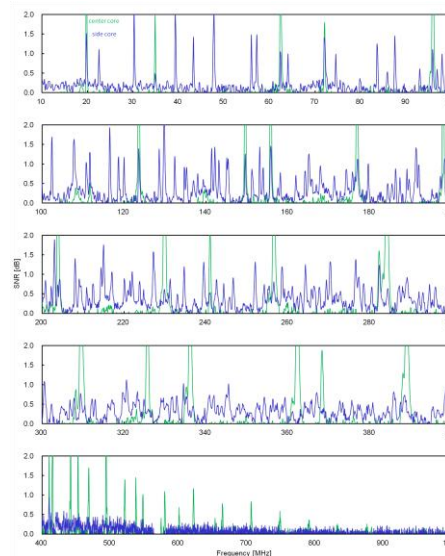


Fig. 7.2. Measured spontaneous depolarized GAWBS: the spectrum in side core (blue), the spectrum in center core (green).

より、自然と誘導を切り替えることにより、MCF 中の XPM の制御可能性がある。

⑧ ブリルアンロスを用いた GAWBS の制御[C1]

GAWBS の分布測定時には、光相関領域法により音響波が高強度になっている部分におけるスペクトルが相対的に強調されて観測されるため分布測定が可能となっているが、この手法では、分解能の向上に限度がある。そこで、ブリルアンロスを用いて余分な GAWBS を他の周波数帯に移すことを提案する。ここでは、予備実験として、全体測定の結果を示す。実験系を Fig. 8.1 に示す。光源の出力を2つに分け、一方の光の中心周波数をブリルアンゲインが生じる周波数帯とブリルアンロスが生じる周波数帯に分ける。その後合波して FUT に挿入する。なお、ブリルアンロスは、光増幅器の ON/OFF により制御する。もう一方の出力は、誘導ブリルアン散乱光を発生させるために中心周波数を調節した後、FUT に入射する。

実験結果を Fig. 8.2 に示す。ブリルアンロス を ON にすることで GAWBS を除去できていることがわかる。次の段階として、FUT を MCF とし、ブリルアンロス発生光路に 10 m 程度の遅延線を入れ、分布制御を行う予定である。MCF のセンターコア中で局在化した音響波をサイドコアに入れた光の偏波の変化状況から検出する。これは、分解能の向上だけでなく”分布制御”という新たな分野を開拓すると共に、マルチコア光ファイバを用いた光ファイバ網オペレーションシステムの基盤技術の一つとして貢献する。

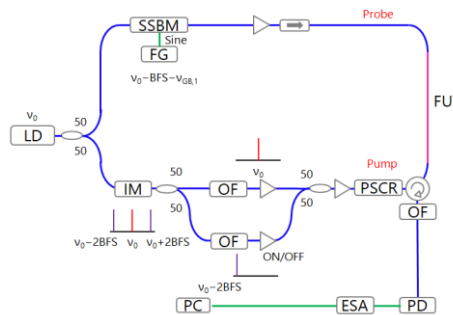


Fig. 8.1. Experimental setup for control of GAWBS using Brillouin loss.

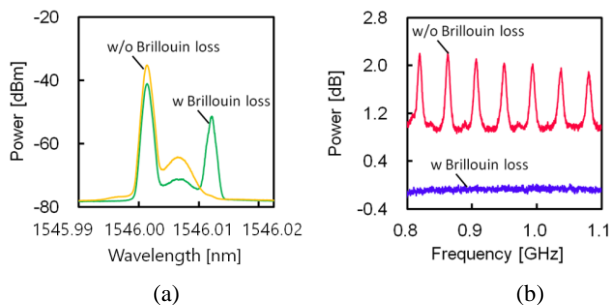


Fig. 8.2. (a) Measured GAWBS spectrum using optical spectrum analyzer. (b) Measured GAWBS spectrum using electrical spectrum analyzer.

⑨ 分布型光ファイバセンサ敷設用の高精度ライダーの開発[C2]

光ファイバセンサの設置時に必要とされる高精度な位置決め技術として、超高精度なライダーシステムを開発した。これは、空間分解能が 20 μm と従来技術の約 50 倍になっている。測定原理として、通常のようにパルス光を用いるのではなく、光の振幅に変調を施している(振幅変調)。また、集光系を組み合わせている。さらに、10 GHz の偏波スクランプリングを行うことで、測定対象物に微細な溝が存在している場合でも信号対雑音比を保つことが可能である。これらの技術は、将来、分布型光ファイバセンサの敷設時に役立つと考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件)

- [J1] Neisei Hayashi, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, Sze Yun Set, Shinji Yamashita. Fiber-optic cascaded forward Brillouin scattering seeded by backward stimulated Brillouin scattering: conceptual proposal and experimental validation. *arXiv preprint arXiv:1804.00452* (2018).
- [J2] Neisei Hayashi, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, Sze Yun Set, Shinji Yamashita. Experimental observation of spontaneous depolarized guided acoustic-wave Brillouin scattering in side cores of a multi-core fiber, *Applied Physics Express*, vol. 11, no. 6, 062502, May. 2018. <https://doi.org/10.7567/APEX.11.062502>
- [J3] Neisei Hayashi, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita. "Observation of depolarized guided acoustic-wave Brillouin scattering in partially uncoated optical fibers." *Japanese Journal of Applied Physics* vol. 57, no. 2, p. 020307, Jun. 2018. <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.020307>
- [J4] Neisei Hayashi, Kohei Suzuki, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita. Temperature coefficient of sideband frequency produced by polarized guided acoustic-wave Brillouin scattering in highly nonlinear fibers. *Applied Physics Express*, vol. 10, no. 9, 092501, Sep. 2017. <https://doi.org/10.7567/APEX.10.092501>
- [J5] Neisei Hayashi, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, Sze Yun Set, Shinji Yamashita. Experimental study on depolarized GAWBS spectrum for optomechanical sensing of liquids outside standard

fibers, *Optics Express*, vol. 25, no. 3, pp. 2239-2244, Jan. 2017.
<https://doi.org/10.1364/OE.25.002239>

〔学会発表〕（計 40 件）

- [C1] Neisei Hayashi, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, Chao Zhang, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita, “Correlation-domain distributed temperature sensing based on enhanced forward Brillouin scattering”, In *CLEO: Science and Innovations* (pp. AF1K.5). Optical Society of America, May, 2019.
- [C2] Chao Zhang, Neisei Hayashi, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita, “Polarization-insensitive amplitude-modulated CW LiDAR”, In *CLEO: Science and Innovations* (pp. JTh2A.85). Optical Society of America, May, 2019.
- [C3] Neisei Hayashi, Kohei Suzuki, Sze Yun Set, and S. Yamashita. Temperature dependence of polarized GAWBS spectrum in high nonlinear fibers, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), Proceedings of CLEO2017, Optical Society of America, pp. STh1K-1, May, 2017.
- [C4] Neisei Hayashi, Yosuke Mizuno, Kentaro Nakamura, Sze Yun Set, Shinji Yamashita. Fiber-optic guided acoustic-wave Brillouin scattering properties and sensing application, 25th International Conference on Advanced Laser Technologies (ALT 2017), Proceedings of ALT2017, paper TC-I I-4, Sep. 2017<invited>.

その他の学会発表が 36 件

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

山下・セット研究室 HP: <http://www.cntp.t.u-tokyo.ac.jp/publications/>

東京工業大学文献検索システム：

http://t2r2.star.titech.ac.jp/cgi-bin/researcherpublicationlist.cgi?q_researcher_content_number=654d87970f6bb00b23490569d1343a60&q_year_from=2018&q_year_to=2018&tab_yf=2018

アウトリーチ活動[全 8 件]

- [O1] Chao Zhang, Neisei Hayashi, Sifan Liu, Fulin Xiang, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita. High-precision 3D laser scanner, South by Southwest (SXSW), Oral presentation and getting budget form Todai To Texas, Austin, TX, Mar. 2019.
- [O2] Chao Zhang, Neisei Hayashi, Sifan Liu, Fulin Xiang, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita, High-precision 3D laser scanner”, SPIE Startup Challenge, San Francisco, oral presentation, semi-finalist, CA, Feb. 2019.
- [O3] Chao Zhang, Neisei Hayashi, Sifan Liu, Fulin Xiang, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita , High-precision 3D laser scanner”, 第 3 回 IPC 起業支援プログラム審査会, oral presentation, Finalist, Tokyo, 22 & 29 Sep., 2018.
- [O4] Chao Zhang, Neisei Hayashi, Sifan Liu, Fulin Xiang, Sze Yun Set, and Shinji Yamashita, High-precision 3D laser scanner, Todai To Texas (TTT) Demo Day, oral presentation and demonstration, getting Demo Day Award and Audience Award Tokyo, 24 Sep. 2018.

その他のアウトリーチ活動 4 件

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：山下 真司

ローマ字氏名：(Yamashita, Shinji)

研究協力者氏名：セツト ジ イオン

ローマ字氏名：(Sze, Yun, Set)

研究協力者氏名：水野洋輔

ローマ字氏名：(Mizuno, Yosuke)

研究協力者氏名：中村健太郎

ローマ字氏名：(Nakamura, Kentaro)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。