

| | |
|-----------|---|
| 1. 氏名 | 水野 洋輔 |
| 2. 所属機関 | 横浜国立大学 大学院工学研究院 |
| 3. 研究題目 | 任意波形変調と動画像処理技術の併用による光ファイバセンサの性能進化 |
| 4. 研究の目的: | <p>昨今、高度経済成長期に築かれた公共インフラの老朽化や災害による被害が重大な課題となっている。これに対応するため、インフラ内に光ファイバを組み込み、その状態を常時監視する技術の必要性が増している。この背景の下、光ファイバを用いてその長さに沿って任意の地点の伸び(歪)や温度を計測可能な「分布型光ファイバセンサ」の開発が進められている。これまでに、我々は変調した連続波の位相相関を利用して歪や温度を位置ごとに識別する革新的手法「ブリルアン光相関領域反射計(BOCDR)」を考案した。これは光ファイバの一端からの光入射により動作し、世界最高レベルの空間分解能と動作速度を有する唯一の技術である。ただし、現在のところ、測定レンジや測定可能な最大歪の大きさ、精度や安定性などの他の性能面で改善の余地がある。</p> <p>そこで、本研究では、BOCDR の光周波数変調波形を正弦波だけでなく任意の形状に拡張すること、また、散乱スペクトルを情報豊富な画像(時間変化する場合は動画)として扱い、成熟した動画像処理技術を応用することなど、既存の枠を超えた新しいアプローチを取り入れて、BOCDR の各性能を世界最高水準に引き上げることを目的とする。</p> |

| | |
|---|--|
| 5. 研究の内容(手法、経過、評価など。書ききれない場合には、同一様式のページを追加してください。): | <p>本項では、特に著しい成果を得ることに成功した「①: 任意波形変調に基づく BOCDR の提案」および「②: 歪ダイナミックレンジの制限のない高速 BOCDR の提案」の研究内容について詳細を記す。</p> <p>①: 任意波形変調に基づく BOCDR の提案</p> <p>BOCDR を含む相関領域法では、光源出力の周波数に変調を印加し、測定ファイバ中に「相関ピーク」を生成する。この相関ピークからのブリルアン散乱信号を選択的に抽出することで、分布測定が可能となる。通常、周波数変調の波形としては、実装が容易な正弦波変調が用いられている。光周波数に正弦波変調を印加する手法としては、光源の駆動電流に正弦波変調を印加する「直接変調方式」が主流であった。これは、光源の出力周波数が駆動電流に依存する性質を用いたものであり、低コストでの実装が可能である。しかし、以下の 4 つの欠点も存在する。すなわち、(1) 高速かつ深い変調の印加に適したレーザを選定する必要がある、(2) 周波数と同時に光パワーの変調が不可避であり、性能が劣化する可能性がある、(3) 変調振幅が変調周波数に強く依存し、空間分解能が測定位置に大きく依存する、(4) 光源の特性により、印加可能な変調周波数が低く抑えられてしまう、の 4 点である。</p> <p>このような直接変調方式の欠点を克服するため、我々は、電気光学変調器を用いて光周波数を変調する「外部変調方式」を提案し、特性評価を行った。その結果、少なくとも直接変調方式の欠点のうち(1)(3)(4)を緩和できることが確認された。また、外部変調方式による BOCDR の基本的な動作も確認した。ここで、外部変調方式の特徴を活かすことで、正弦波に限らない任意波形での光周波数変調に基づく相関領域法の実装が可能となる。これまでも、相関ピークのサイドローブの影響を低減するために、アポダイゼーションの原理に基づき正弦波をベースとした変調波形を用いた例は報告されているが、任意波形を視野に入れた周波数変調波形の設計はこれまでに報告がなかった。最適な変調波形を設計することによって、分布測定の性能</p> |
|---|--|

5. 研究の内容(続き):

を向上できる可能性がある。しかし、従来の相関領域法における空間分解能の理論値は、正弦波変調を前提として導出されたものであり、任意波形変調における空間分解能は未解明であった。変調波形の最適化のためには、変調波形の「質」を定量化する指標が必須である。

そこで本研究では、任意波形変調に基づく相関領域法における空間分解能の指標をシミュレーションに基づいて解明した。種々の任意波形のうち、今回はチャープ波形を特徴づけるいくつかのパラメータを変化させることで多様な波形を生成した。

②: 歪ダイナミックレンジの制限のない高速 BOCDR の提案

2008年の提案以降、BOCDRの動作は電気スペクトラムアナライザ(ESA)における周波数掃引に律速され、実現可能なサンプリングレート(1点における歪測定速度)は20 Hzに届かず[1]、結果として分布測定に比較的長時間(数10秒~数分)がかかるという問題があった。そこで、2016年に、ESAによる周波数掃引を撤廃した位相検波方式および傾斜利用方式という超高速BOCDRを提案した。最高で100 kHzという高いサンプリングレートを達成したものの、両方式ともに歪ダイナミックレンジ(測定可能な最大歪)が0.2%程度に制限されてしまうという問題があった。

そこで本研究では、図1に示す一連の信号処理によって、歪ダイナミックレンジの制限を撤廃しつつ、従来以上の高速動作を実現する:「(1)各測定位置で取得したBGSを周波数が鋸波形状に高速で変化する電気信号と混合する、(2)周波数領域で高速で繰り返しシフトするBGSのある固定周波数におけるパワーを取得する、(3)電気領域で高速に取得されるBGSをそのまま出力する、(4)測定位置を掃引しながら以上の処理を繰り返すことでBGS分布を描画する、(5)後からBFS分布(=歪分布)を算出する」。

(3)にて逐次BFSを算出した場合にはサンプリングレートは数100 Hzに制限されていたが、非逐次算出により劇的な速度向上が期待できる。また、(5)の処理では、従来の1スペクトルよりも遥かに多くの情報を含む「画像」としてBGS分布全体を取り扱うことで、画像処理分野で培われてきた高度な雑音除去技術を適用でき、精度や安定性を向上できると考えられる。さらに、高速に振動分布を測定する場合などは、動画処理技術も適用できると考えられる。

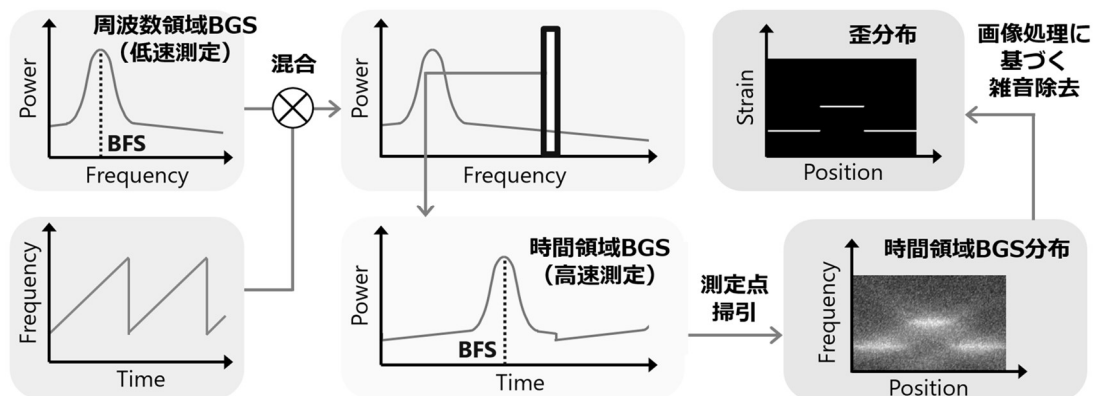


図1. 超高速・高精度・高安定での歪分布測定の原理。

6. 研究の成果と結論、今後の課題:

本研究により、数々の顕著な成果を得ることができた。ここでは、全項に対応して、「①: 任意波形変調に基づく BOCDR の提案」および「②: 歪ダイナミックレンジの制限のない高速 BOCDR の提案」の成果や結論、今後の課題について記す。

①: 任意波形変調に基づく BOCDR の提案

シミュレーションで用いた各用語や記号の定義、各種条件、途中結果などの詳細は、煩雑となるので本報告書では省略するが、最終的に得られた裾野の凸度と空間分解能の関係を図 2 に示す。また、ほぼすべての任意波形に共通して、凸度が大きいほど空間分解能が劣化しており、その依存性はおよそ線形であった。この直線を「空間分解能限界線」と呼ぶことにする。以下、特徴的な波形ごとに結果と考察を述べる。

- (1) **正弦波変調** ($L_{FUT} = 100 \text{ m}, 10 \text{ m}$): 測定ファイバ(FUT)長が 100 m と 10 m の場合の空間分解能はお互いほぼ一致した(データ A1~A4)。変調周波数 1 MHz、変調振幅 2.0 GHz の正弦波で変調した場合、約 0.5 m の空間分解能が得られたが、これは従来の式による理論分解能(0.48 m)とよく一致した。
- (2) **正弦波変調** ($L_{FUT} = 1 \text{ m}$): 一部のデータ(A5)の空間分解能が限界線より劣化した。これらのデータは、従来の理論式による空間分解能が 1 m 程度のときに 1 m の FUT を観測するという、通常の運用では想定しづらい条件である。しかし、シミュレーション上では 0.4 m という従来の理論より高い、無意味ではない空間分解能が得られた。以上の正弦波変調で生成される実効範囲内のビートスペクトルを調査したところ、FUT 長が 1 m の場合は、ビートスペクトルの中心近傍のみが実行範囲の大部分を占めた。そのため、拡散領域を前提として導出された従来の空間分解能の理論値と一致しないと考えられる。一方、FUT 長が 100 m の場合は、両側に隣接するビートスペクトルの中心近傍が観測されたが、実行範囲の端は分布測定への影響は比較的小さいため、従来の理論と合致する結果が得られた。
- (3) **S** ($L_{FUT} = 1 \text{ m}$): 空間分解能が限界線の 2 倍程度に劣化していることが分かる(S1, S2)。この場合の変調波形と実効範囲内のビートスペクトルを調査したところ、これらの条件下では、スペクトルが十分に拡散されず、0 Hz 付近に大きな山が存在することがわかった。これが原因で、実際の雑音スペクトルの

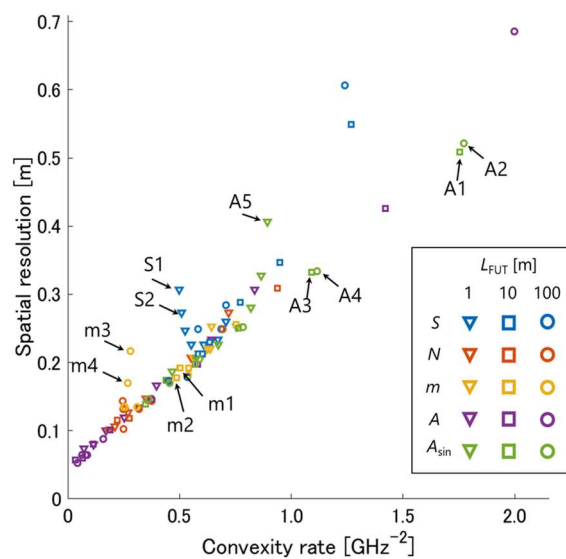


図 2. シミュレーションで得られた裾野の凸度に対する空間分解能の依存性。

6. 研究の成果と結論、今後の課題(続き):

ピークは、それを近似した 2 次関数のピークよりも高くなっていると考えられる。したがって、凸性の評価から予想される空間分解能よりも劣化したと考えられる。

- (4) $m(L_{FUT} = 100 \text{ m}, 10 \text{ m})$: FUT 長が 10 m の場合の空間分解能は限界線に近い値であるが($m1, m2$)、100 m の場合は限界線の 2 倍程度に劣化している($m3, m4$)。この場合の変調波形と実効範囲内のビートスペクトルを調査したところ、両者のビートスペクトルを比較すると、FUT 長が 10 m の場合に比べ、100 m の場合はスペクトルが十分に拡散されていない領域を含んでいた。このため、2 次関数による近似が適さず、凸性の評価から予想される空間分解能よりも劣化したと考えられる。

以上より、BOCDR において、従来の正弦波に代わり、任意形状の波形で周波数変調を施した場合の空間分解能等の各種性能をシミュレーションと理論を通じて明らかにすることができた。最大の成果として、空間分解能が、ビートスペクトルの裾野の凸度に比例することを解明した。この結果は、正弦波変調を前提とした従来の空間分解能の理論とも整合するものであり、より一般的な空間分解能の指標を提示できたといえる。本評価指標はビートスペクトル形状に基づいているため、強度変調を伴うより複雑な変調手法に対しても同様に適用できると考えられる。今後は、これらの評価指標の妥当性を実験的に検証していく予定である。

②: 歪ダイナミックレンジの制限のない高速 BOCDR の提案

提案する高速 BOCDR の実験系を図 3 に示す。光学系は一般的な BOCDR と共通であり、1550 nm 帯のレーザの駆動電流に直接変調を印加し、光出力に対して周波数変調を施すことで、FUT 中に相関ピーク(=測定位置)を生成する。これを FUT 内で掃引し、BGS および BFS の分布を取得する。本実験系の新規性は、BGS を取得するための信号処理系にある。まず、電圧制御発振器(VCO)を用いて、周波数が高速に繰り返し掃引された電気信号を生成する。次に、これを BGS とミキシングし、ESA で観測、そのゼロスパン出力をオシロスコープで観測する。この一連の処理により、本来周波数領域であった BGS を時間領域に変換することができる。その結果、BGS のサンプリングレートの制限要因が、ESA の周波数掃引速度から VCO に印加する信号発生器の電圧掃引速度に移行され、高速測定が可能となる。振動検出の実験で用いた FUT の構成を図 4 に示

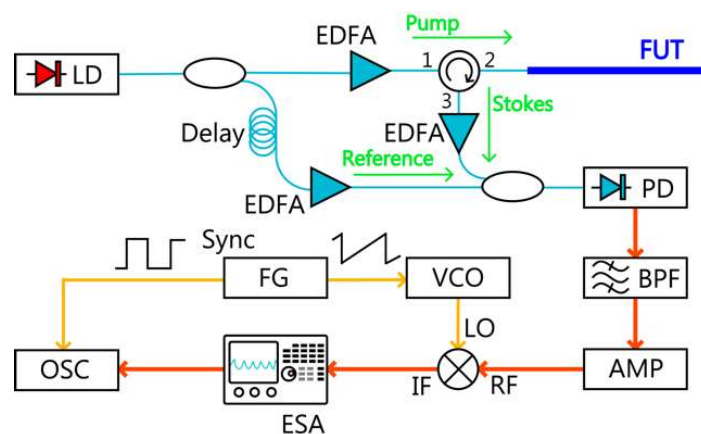


図 3. 歪ダイナミックレンジの制限のない高速 BOCDR の実験系。AMP: amplifier, BPF: band-pass filter, EDFA: erbium-doped fiber amplifier, ESA: electrical spectrum analyzer, FG: function generator, FUT: fiber under test, IF: intermediate frequency, LO: local oscillator, OSC: oscilloscope, PD: photo diode, RF: radio frequency, VCO: voltage-controlled oscillator.

6. 研究の成果と結論、今後の課題(続き):

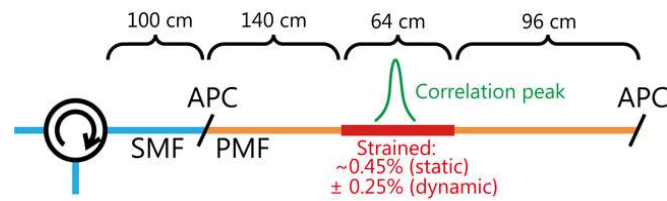


図 4. 振動検出の実験で用いた測定ファイバの構成。

す。振動による偏波変動の影響を抑制するために、偏波維持光ファイバ(PMF; BFS = 10.79 GHz)を用いた。64 cm の区間に 0.45% の静的歪を印加した状態で、さらに $\pm 0.25\%$ の動的歪(40 Hz で正弦波振動)を印加した。変調周波数を 429.3 kHz とすることで、歪印加区間の中央に相関ピークを生成した。また、変調振幅は 4.9 GHz とした(理論空間分解能は約 50 cm)。

まず、FUT に歪を印加しない状態で、サンプリングレート(VCO に印加する電圧掃引信号の繰り返し周波数)を振って、時間領域で観測される BGS の形状の変化を調査した。サンプリングレートが 400 Hz, 2 kHz, 10 kHz, 50 kHz のときの BGS を図 5(a)–(d) にそれぞれ示す。縦軸は正規化した。400 Hz および 2 kHz のときは BGS の形状が明瞭であったが、10 kHz ではノイズが重畳し始め、50 kHz ではピーク検出が困難となった。このノイズはサンプリングレートに関わらず一定の周期を有していた。この周期は約 430 kHz であり、変調周波数と一致したことから、レーザ光の周波数変調に伴う意図しない強度変調の影響であると推測される。このノイズは、直接変調方式かつ BGS 全体を取得する高速 BOCDR では本質的といえる。

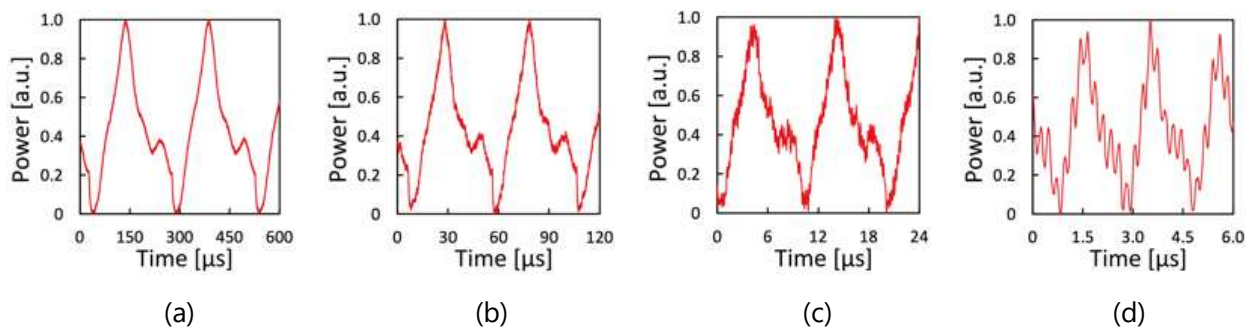


図 5. サンプリングレートが (a) 400 Hz、(b) 2 kHz、(c) 10 kHz、(d) 50 kHz、のときの正規化された時間領域 BGS の測定結果。

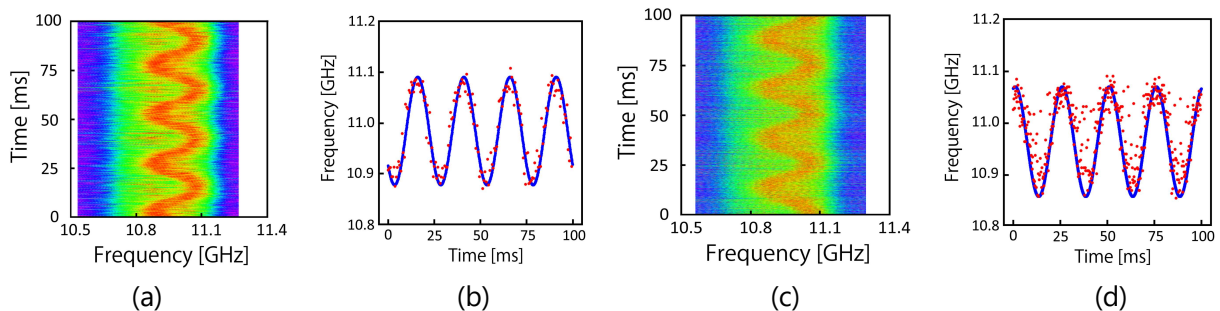


図 6. サンプリングレートが (a,b) 8 kHz、(c,d) 20 kHz、のときの (a,c) BGS、および、(b,d) BFS の時間変化の測定結果。青い実線は理論曲線を示す。

6. 研究の成果と結論、今後の課題(続き):

次に、40 Hz の振動検出を実証した。サンプリングレートは、上記のノイズが十分に小さいと考えられる 8 kHz、および、比較のために 20 kHz に設定した。BGS および BFS の時間変動を図 6(a)–(d) に示す。BGS の最大値を与える周波数を取得し 5 回平均した点を BFS としてプロットした。青線は理論曲線である。振動 1 周期のプロット点数は、8 kHz のとき 40 点、20 kHz では 100 点であることから、確かに設定通りのサンプリングレートが達成できていることが確認できた。8 kHz のときに比べて 20 kHz のときの歪の測定誤差が大きいのは、先述のノイズの影響であると考えられる。

最後に、ノッチフィルタ(帯域除去フィルタ:BEF)を利用して強度変調に起因するノイズの影響を抑制し、高速 BOCDR による振動測定の信号対雑音比(SNR)の向上可能性を検証した。詳細は省略するが、FUT に歪を印加しない状態で、BEF によるノイズ抑制の効果を検証した。サンプリングレートが 10 kHz および 20 kHz のときの時間領域 BGS を 図 7(a),(b)および図 7(c),(d)にそれぞれ示す。縦軸は、描画範囲内の最大・最小値で正規化した。BEF がない(a),(c)では強度変調に起因する周期的なノイズが重畳した。ノイズの周波数は 137.5 kHz であり、変調周波数と等しいことが確認された。一方、BEF を適用した (b),(d)では、ノイズが抑制され、BGS の形状が明瞭となった。

次に、40 Hz の振動検出における BEF の有用性を検証した。サンプリングレートが 10 kHz および 20 kHz のときの BGS の時間変動を図 8(a),(b)および図 8(c),(d)にそれぞれ示す。どの条件においても振動が検出されたが、BEF を適用しない(a),(c)では、強度変調に起因するノイズが細かい斜線となって現れた(変調周波数がサンプリングレートの整数倍となっていないために、ノイズの位相が時間的に移動することに起因)。一方で、BEF を適用した (b),(d) では、斜線が消えており、ノイズの抑制が確認された。

今後は、本技術をベースとして、片端光入射型光ファイバセンサとして世界最高となる、100 kHz を超えるサンプリングレートの実現を目指す。

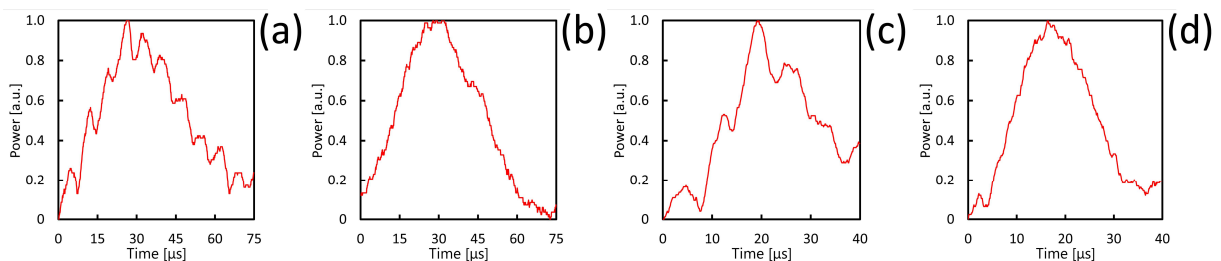


図 7. サンプリングレートが (a,b) 10 kHz、(c,d) 20 kHz、のときの正規化された時間領域 BGS の測定結果。(a,c) BEF 適用なし、(b,d) BEF 適用あり。

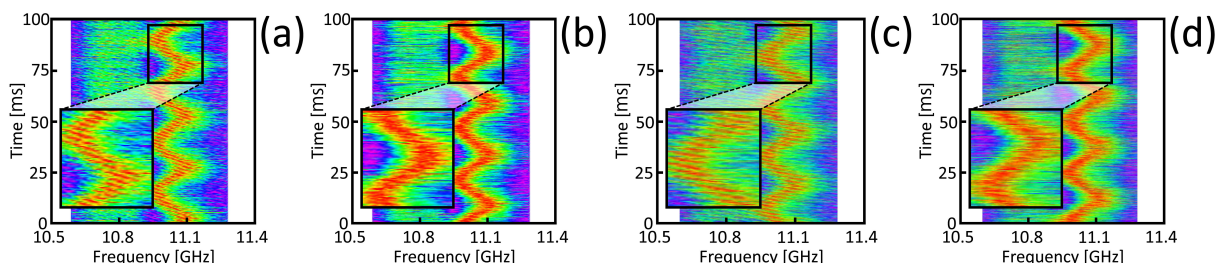


図 8. サンプリングレートが (a,b) 10 kHz、(c,d) 20 kHz、のときの BGS の時間変化の測定結果。(a,c) BEF 適用なし、(b,d) BEF 適用あり。インセットは一部の拡大図を示す。

6. 成果の価値

7.1_学術的価値:

我々が提案・性能改善を推進している分布型光ファイバセンサ「BOCDR」は、光ファイバの片端からの光入射による動作、超高速動作、高い空間分解能、および、広範な歪ダイナミックレンジを兼ね揃える、世界で唯一の技術である。この技術革新は、**分布型光ファイバセンサの極限性能を世界に示す**ものであり、顕著な学術的インパクトを有する。さらに、本成果の一部は、分布型光ファイバセンサの領域を超え、対象までの距離とその振動を同時検出可能な「**相関領域ライダ**」、特殊加工不要の温度プローブ、プラスチック光ファイバビューズの観測や特性解明、その種々のセンサ(超高感度磁場センサを含む)への応用など、**新たな技術提案に大きく貢献**しており、その意味でも学術的価値が優れているといえる。

7.2_社会的価値:

本研究成果は、光学や計測の学術分野のみならず、構造物のヘルスマonitoringに興味を持つ**環境、建築、土木分野の企業や、防災・減災を重要な課題とする政府にも、顕著な影響**を与えると期待される。さらに、本成果により BOCDR 技術の実用化が促進され、地震の被害や経年劣化を自己診断できる構造物や材料の開発を促進し、**防災、環境保護、危機管理技術の拡充に貢献**することが可能である。これは、人類の生活の安全性と持続可能性を高める上で重要な役割を果たすと考えられる。加えて、導波路診断、ウェアラブルデバイス、ロボット技術、深海探査、宇宙開発などの多岐にわたる分野への応用は、**新しい産業の創出**という社会的インパクトを生み出すことが期待される。

7.3_研究成果:

・「研究論文(原著)」

1. K. Kikuchi, H. Lee, R. Inoue, K. Ozaki, H. Sasage, and Y. Mizuno, "Accurate estimation of modulation amplitude in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on Rayleigh noise spectrum," Sci. Rep., in press.
2. T. Kiyozumi, S. Yoshida, K. Noda, and Y. Mizuno, "Simplified correlation-domain LiDAR without long delay fiber," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 63, no. 3, 038002 (2024).
3. K. Toda, H. Takahashi, Y. Koshikiya, and Y. Mizuno, "Fiber-tip temperature sensing probe based on standard Brillouin optical correlation-domain reflectometry with sinusoidal modulation," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 63, no. 2, 020907 (2024).
4. T. Nakanishi, A. Kato, Y. Wada, R. Nakashima, C. Zhao, C. Y. Lo, K. Nakamura, H. Lee, Y. Mizuno, and D. Yamane, "Multimode interference-based strain sensing using micro dry-etched perfluorinated polymer optical fibers," Jpn. J. Appl. Phys., vol. 63, no. 2, 028003 (2024).
5. T. Kiyozumi, K. Noda, G. Zhu, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Modified expression for spatial resolution in optical correlation-domain reflectometry," IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 73, 7001711 (2024).
6. H. Sasage, K. Nakamura, Y. Mizuno, and H. Lee, "Simplified setup for Brillouin scattering observation using variable reflectivity mirror and its polarisation characteristics," Electron. Lett., vol. 59, no. 24, e13053 (2023).
7. H. Javid, G. Zhu, K. Noda, S. Watanabe, K. Nakamura, H. Lee, and Y. Mizuno, "Reflectometric

- configuration for polymer optical fiber Bragg grating-based real-time tactile sensing," *Appl. Phys. Express*, vol. 16, no. 11, 112001 (2023).
8. K. Wang, Y. Mizuno (co-first author), X. Dong, W. Kurz, M. Köhler, P. Kienle, H. Lee, M. Jakobi, and A. W. Koch, "Multimode optical fiber sensors: from conventional to machine learning-assisted," *Meas. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 2, 022002 (2023) [招待].
 9. K. Otsubo, G. Zhu, T. Kiyozumi, K. Noda, K. Nakamura, H. Lee, and Y. Mizuno, "Systematic-error suppression in low-coherence Brillouin optical correlation-domain reflectometry," *Sci. Rep.*, vol. 13, 17531 (2023).
 10. Y. Suzuki, H. Lee, H. Sasage, K. Noda, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Proof-of-concept demonstration of double-slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 62, no. 10, 108005 (2023).
 11. K. Toda, K. Otsubo, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Fiber-optic temperature probe based on low-coherence Brillouin optical correlation-domain reflectometry," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 81, 103435 (2023).
 12. S. Ochi, K. Ozaki, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Guideline for improving spatial resolution in direct-modulation Brillouin optical correlation-domain reflectometry," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 62, no. 8, 088001 (2023).
 13. Y. Mizuno, "Surpassing 1,000,000 resolving points in chaotic Brillouin sensing," *Adv. Photon.*, vol. 5, no. 3, 030502 (2023) [Commentary].
 14. P. Gorai, Y. Mizuno, M. Kumar, and R. Jha, "Molecular imprinting polymer nanoparticles coupled with an optical sensor for sensitive and label-free detection of p-cresol," *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 6, no. 14, pp. 12946-12956 (2023).
 15. M. Sakamoto, H. Sasage, K. Nakamura, Y. Mizuno, and H. Lee, "Influence of reference path length on self-heterodyne-based Brillouin observation," *Electron. Lett.*, vol. 59, no. 13, e12856 (2023).
 16. Y. Mizuno, N. Motoishi, K. Noda, A. Theodosiou, K. Kalli, H. Lee, K. Nakamura, and M. A. Soto, "Fiber Bragg gratings operating across arbitrary wavelength ranges," *Appl. Phys. Express*, vol. 16, no. 6, 062005 (2023).
 17. T. Miyamae, G. Zhu, T. Kiyozumi, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Observation of Rayleigh scattering by simplified optical correlation-domain reflectometry without frequency shifter," *Appl. Phys. Express*, vol. 16, no. 5, 052004 (2023).
 18. K. Wang, Y. Mizuno, H. Lee, X. Dong, W. Kurz, M. Fink, M. Jakobi, and A. W. Koch, "Experimental demonstration of offset-induced sensitivity enhancement in SMS-based temperature and strain sensing," *Appl. Phys. Express*, vol. 16, no. 5, 052003 (2023).
 19. Y. Yao, Y. Lu, and Y. Mizuno, "Proposal of compressed sensing-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry for effective repetition rate enhancement," *Appl. Phys. Express*, vol. 16, no. 3, 032005 (2023).
 20. G. Zhu, T. Miyamae, H. Takahashi, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Compensation of noise floor distortion in long-range simplified optical correlation-domain reflectometry without the use of electrical spectrum analyzer," *Appl. Phys. Express*, vol. 16, no. 1, 012013 (2023).

21. Y. Yao, Y. Lu, and Y. Mizuno, "Swallow neural network-empowered high-speed Brillouin optical correlation-domain reflectometry: optimization and real-time operation," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 72, 7002212 (2023).
22. G. Zhu, T. Miyamae, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "High-speed high-resolution optical correlation-domain reflectometry without using electrical spectrum analyzer," *Opt. Laser Technol.*, vol. 161, no. 6, 109120 (2023).
23. H. Sasage, M. Sakamoto, K. Noda, K. Nakamura, Y. Mizuno, and H. Lee, "Total spectral power-based method for estimating Brillouin frequency shift in optical fibers," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 62, no. 1, 018002 (2023).
24. K. Wang, Y. Mizuno, X. Su, X. Dong, W. Kurz, M. Fink, H. Lee, M. Jakobi, and A. W. Koch, "Core diameter and numerical aperture dependences on the performance of fiber-optic multimode interference sensing," *Appl. Phys. Express*, vol. 16, no. 1, 012003 (2023).
25. K. Noda, H. Lee, S. Watanabe, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Potential of high-sensitivity tactile sensing using polymer optical fiber gratings," *Appl. Phys. Express*, vol. 15, no. 12, 122005 (2022).
26. K. Wang, Y. Mizuno, K. Kishizawa, Y. Toyoda, H. Lee, K. Ichige, W. Kurz, X. Dong, M. Jakobi, and A. W. Koch, "Temperature sensing based on multimode interference in polymer optical fibers: sensitivity enhancement by PC-APC connections," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 61, no. 11, 118001 (2022).
27. K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Proposal of polarization optical correlation-domain reflectometry (POCDR)," *J. Lightwave Technol.*, vol. 40, no. 16, pp. 5708-5715 (2022).
28. T. Kiyozumi, T. Miyamae, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Super-simplified optical correlation-domain reflectometry," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 61, no. 7, 078005 (2022) [Featured in "Spotlights 2022"].
29. K. Toda, K. Kishizawa, Y. Toyoda, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, K. Ichige, and Y. Mizuno, "Characterization of modal interference in multi-core polymer optical fibers and its application to temperature sensing," *Appl. Phys. Express*, vol. 15, no. 7, 072002 (2022).
30. K. Wang, Y. Mizuno, X. Dong, W. Kurz, M. Fink, M. Jakobi, and A. W. Koch, "Strain-insensitive high-sensitivity temperature sensing based on multimode interference in a square-core fiber," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 61, no. 7, 078002 (2022).
31. Y. Yao and Y. Mizuno, "Dynamic strain measurement in Brillouin optical correlation-domain sensing facilitated by dimensionality reduction and support vector machine," *Opt. Express*, vol. 30, no. 9, pp. 15616-15633 (2022).
32. G. Zhu, K. Kishizawa, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Wide-dynamic-range Brillouin optical correlation-domain reflectometry with 20-kHz sampling rate," *IEEE Sens. J.*, vol. 22, no. 7, pp. 6644-6650 (2022).
33. T. Paixão, J. H. Belo, A. F. Carvalho, V. S. Amaral, J. P. Araújo, H. Lee, K. Nakamura, Y. Mizuno, P. André, and P. Antunes, "Magneto-responsive optical fiber with fuse-effect-induced fluorinated graphene oxide core," *Adv. Photon. Res.*, vol. 3, no. 6, 2100209 (2022).
34. A. Leal-Junior, C. Marques, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Sensing applications of polymer optical fiber fuse," *Adv. Photon. Res.*, vol. 3, no. 6, 2100210 (2022) [招待].

35. H. Lee, C. Zhao, T. Kiyozumi, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Fiber-optic temperature sensor based on inline core-cladding-mode Mach-Zehnder interferometry with dynamically controllable sensing length," *Appl. Phys. Express*, vol. 15, no. 2, 022002 (2022).
36. T. Kiyozumi, T. Miyamae, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Pilot demonstration of correlation-domain LiDAR for high-speed vibration detection," *APL Photon.*, vol. 6, no. 10, 101302 (2021).
37. Y. Yao and Y. Mizuno, "Neural network-assisted signal processing in Brillouin optical correlation-domain sensing for potential high-speed implementation," *Opt. Express*, vol. 29, no. 22, pp. 35474-35489 (2021).
38. J. N. Caceres, K. Noda, G. Zhu, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Spatial resolution enhancement of Brillouin optical correlation-domain reflectometry using convolutional neural network: proof of concept," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 124701-124710 (2021).
39. Y. Mizuno, S. Liehr, A. Theodosiou, K. Kalli, H. Lee, and K. Nakamura, "Distributed polymer optical fiber sensors: a review and outlook," *Photon. Res.*, vol. 9, no. 9, pp. 1719-1733 (2021) [招待] [Selected as Editors' Articles of Interest].
40. G. Zhu, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Error compensation in Brillouin optical correlation-domain reflectometry by combining bidirectionally measured frequency shift distributions," *Appl. Phys. Express*, vol. 14, no. 5, 052006 (2021).
41. K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on arbitrary waveform modulation: a theoretical study," *Opt. Express*, vol. 29, no. 9, pp. 13794-13805 (2021).

・「国際会議発表」

1. T. Kiyozumi, K. Noda, G. Zhu, H. Kato, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Experimental verification of modified theory on synthesis of optical coherence functions", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper Tu3.25, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
2. H. Takahashi, Y. Mizuno, and Y. Koshikiya, "Brillouin-based PON monitoring using ERA-BOTDA with differential width pairs of frequency-swept pump pulses", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper Tu3.26, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
3. Y. Mizuno, K. Kalli, N. Motoishi, K. Noda, A. Theodosiou, H. Lee, K. Nakamura, and M. A. Soto, "Arbitrary wavelength range operation of plastic optical fiber Bragg gratings", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper Tu3.62, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
4. S. Yoshida, T. Kiyozumi, and Y. Mizuno, "Understanding noise floor behavior in optical correlation-domain reflectometry with acousto-optic modulator", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper Tu3.71, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
5. K. Ozaki, S. Ochi, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Effect of light source linewidth on spectral broadening in external-modulation BOCDR", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper Tu3.82, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.

6. M. Sakamoto, T. Miyamae, K. Noda, K. Nakamura, H. Lee, and Y. Mizuno, "Extension of measurement range in OADR based on double-modulation scheme", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper W4.14, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
7. S. Ochi, K. Ozaki, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Investigation of guidelines for improving spatial resolution in direct-modulation BOADR", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper W4.15, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
8. K. Otsubo, T. Kiyozumi, K. Noda, K. Nakamura, H. Lee, and Y. Mizuno, "High-resolution low-coherence Brillouin optical correlation-domain reflectometry with suppressed systematic error", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper W4.46, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
9. K. Kikuchi, H. Lee, R. Inoue, K. Ozaki, H. Sasage, and Y. Mizuno, "Rayleigh-based accurate estimation of modulation amplitude in Brillouin optical correlation-domain reflectometry", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper W4.89, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
10. K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Comprehensive evaluation of spatial resolution in Brillouin optical correlation-domain reflectometry", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper Th6.41, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
11. H. Javid, K. Noda, S. Watanabe, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Reflectometric configuration for plastic optical fiber Bragg grating-based real-time touch sensing", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper Th6.58, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
12. K. Wang, K. Kishizawa, K. Noda, X. Dong, W. Kurz, A. W. Koch, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Suppression of temperature-dependent spectral power fluctuations in multimode FBG", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper Th6.60, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
13. G. Zhu, K. Goya, K. Noda, H. Lee, and Y. Mizuno, "Strain and temperature dependences of Brillouin frequency shift in ZBLAN fiber", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper Th6.64, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
14. K. Toda, K. Otsubo, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Fiber-optic temperature sensing probe using low-coherence light source", 28th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-28), paper Th6.65, Hamamatsu, Japan, November 20-24, 2023.
15. T. Nakanishi, R. Nakashima, C. T. Lo, H. Lee, Y. Mizuno, and D. Yamane, "Enhanced sensitivity of modal interference-based strain sensing using micro dry-etched perfluorinated polymer optical fibers," 36th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2023), paper 17P-1-75L, Sapporo, Japan, November 14-17, 2023.
16. Y. Mizuno, "Exploring the fundamentals and applications of plastic optical fiber fuse", 4th International Electronic Conference on Applied Sciences (ASEC 2023), paper live-2-5, online, October 27-November 10, 2023 [招待].
17. Y. Mizuno, A. Leal-Junior, C. Marques, H. Lee, and K. Nakamura, "Magnetic field sensing using plastic optical fiber fuse", 30th International Conference on Plastic Optical Fibers (POF 2022), paper 8,

- Bilbao, Basque, Spain, September 26-28, 2022 [招待].
18. K. Wang, Y. Mizuno, K. Kishizawa, Y. Toyoda, H. Lee, K. Ichige, X. Dong, W. Kurz, M. Jakobi, and A. W. Koch, "Accuracy improvement in POF-MMI-based temperature sensing by higher-order mode excitation", 30th International Conference on Plastic Optical Fibers (POF 2022), paper 12, Bilbao, Basque, Spain, September 26-28, 2022.
 19. K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "High-sensitivity lateral force sensing using fs-laser-inscribed POF-FBG", 30th International Conference on Plastic Optical Fibers (POF 2022), paper 44, Bilbao, Basque, Spain, September 26-28, 2022.
 20. H. Sasage, M. Sakamoto, K. Noda, K. Nakamura, Y. Mizuno, and H. Lee, "Cost-efficient method for estimating Brillouin frequency shift in plastic optical fibers", 30th International Conference on Plastic Optical Fibers (POF 2022), paper P16, Bilbao, Basque, Spain, September 26-28, 2022.
 21. Y. Mizuno, "Plastic optical fiber fuse: characterization and sensing applications", International Conference on Optical Precision Measurements 2022 (ICOPM 2022), paper 18-1655, Taiyuan, China, September 17-19, 2022 [招待].
 22. K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "OCDR-based measurement of polarization states", 27th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS 2022), paper Th4.13, Alexandria, Virginia, USA, August 29-September 2, 2022.
 23. T. Miyamae, G. Zhu, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Noise floor analysis and compensation in long-range ESA-free optical correlation-domain reflectometry", 27th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS 2022), paper Th4.14, Alexandria, Virginia, USA, August 29-September 2, 2022.
 24. Y. Mizuno, "Characterization and sensing applications of plastic optical fiber fuse", 2nd International Conference on Innovative Optical Sensors 2022 (ICoIOS 2022), paper 1-1430, online, July 18-19, 2022 [招待].
 25. T. Kiyozumi, T. Miyamae, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Simplest-ever configuration of fiber-optic correlation-domain reflectometry", 27th OptoElectronics and Communications Conference and International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC 2022), paper TuC3-3, Toyama, Japan, July 3-6, 2022 [OECC/PSC 2022 Student Paper Award].
 26. K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, "Measurement accuracy evaluation of high-speed BOCDR with wide strain dynamic range", 27th OptoElectronics and Communications Conference and International Conference on Photonics in Switching and Computing (OECC/PSC 2022), paper TuC3-4, Toyama, Japan, July 3-6, 2022.
 27. H. Lee, K. Noda, Y. Mizuno, and K. Nakamura, "Recent progress in high-speed correlation-domain Brillouin sensing," 19th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON 2021), paper Th4B.1, Qufu, China, August 23-27, 2021 [招待].
 28. Y. Mizuno, H. Lee, and K. Nakamura, "Plastic optical fiber fuse effect and its sensing applications", 12th International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP 2021), paper SC15-25-1330, online, July 23-26, 2021 [招待].
 29. Y. Mizuno, H. Lee, and K. Nakamura, "Plastic optical fiber fuse and its application to magnetic field

sensing”, 26th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2021), paper W5.1, online, July 3-7, 2021 [招待].

30. G. Zhu, K. Noda, H. Lee, K. Nakamura, and Y. Mizuno, “Two-end-access BOCDR for systematic error compensation”, 26th OptoElectronics and Communications Conference (OECC 2021), paper S4F.3, online, July 3-7, 2021.

・「特許」

1. 高橋央、古敷谷優介、水野洋輔, 「光線路特性解析装置」, 特願 2023-175939, 2023 年 10 月 11 日.
2. 高橋央、古敷谷優介、水野洋輔、大坪謙太、清住空樹, 「光ファイバ特性解析装置」, 特願 2023-168035, 2023 年 9 月 28 日.
3. 高橋央、古敷谷優介、水野洋輔、戸田歌音, 「光ファイバ特性解析装置」, 特願 2023-168328, 2023 年 9 月 28 日.

・「受賞」

1. 水野洋輔, 令和 3 年度 文部科学大臣表彰(科学技術分野) 若手科学者賞, 文部科学省, 2021 年度.
2. N. Hayashi, Y. Mizuno (corresponding author), H. Lee, K. Nakamura, S.Y. Set, and S. Yamashita, ELEX Best Paper Award 2020, IEICE Electronics Society, 2021 年度.
3. 水野洋輔、Tso-Fu Mark Chang、山根大輔, 令和 3 年度 コニカミノルタ画像科学奨励賞(連携賞), 公益財団法人コニカミノルタ科学技術振興財団, 2021 年度.
4. 水野洋輔, 令和 3 年度 横浜国立大学優秀研究者賞(奨励賞), 国立大学法人横浜国立大学, 2021 年度.

・「マスコミ報道」

1. 日刊工業新聞(2021 年 10 月 25 日 21 面) 「横浜国大など、ライダーで距離・振動を同時計測 気流”見える化”・異常な揺れ探る」.
2. 科学新聞(2021 年 11 月 12 日 6 面) 「横浜国大など「ライダー」開発 測距と高速振動検出 両方実現する新方式」.
3. 2021 年 11 月頃、多数のニュースサイトに掲載 (Yahoo!ニュース, マイナビニュース, TechCrunch Japan, Optinews, e.x.press, オプトロニクスなど)