

光ファイバ中のブリルアン散乱とそのセンサ応用

東京工業大学 水野 洋輔・中村 健太郎

1. はじめに

物質中には、熱振動によって常に密度の揺らぎが生じており、これは超音波（音響フォノン）となって伝搬する。これを光散乱法によって測定することで、広い周波数帯域にわたる超音波の伝搬を測定することができる。この音響フォノンによる光の散乱現象がブリルアン散乱（Brillouin scattering）である^{(1)~(3)}。ブリルアン散乱測定は、人工的に音波を励振することが困難な高周波領域において特に重要な音波測定手段となり、非破壊検査への応用研究が推進されている。

本稿では、光ファイバ中のブリルアン散乱を中心に、その原理や特徴、測定法、測定の実例を解説する。続いて、これを利用した歪（ひずみ）や温度の分布センサについて紹介する。光ファイバに沿った長い距離にわたって、どこにどれだけ歪が発生している（または温度が変化している）のかを知ることができるため、橋梁やトンネル、護岸のような土木構造物や建物、航空機などの状態を監視する技術として重要性が高まっている。

2. 光ファイバ中のブリルアン散乱

2-1 基本原理⁽³⁾

媒質中を進む光は様々な波長をもつ音響フォノンによって散漫散乱される。このとき、その散乱角 θ と散乱に寄与したフォノンの波長 A 、および真空中の光の波長 λ はブラッグ条件、

$$A = \frac{\lambda}{2n} \sin \frac{\theta}{2} \quad \dots(1)$$

で関連付けられる。 n は媒質の屈折率である。よっ

て、散乱角を選択することで、測定するフォノンの波長を求めることができる。一次元構造をもつ光ファイバにおいては、基本的には後方散乱（ $\theta = \pi$ ）のみを考慮すればよい。

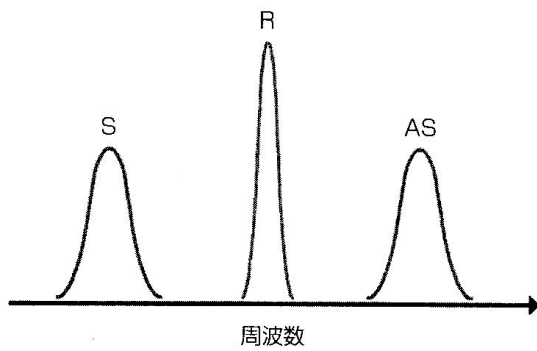
散乱光は伝搬するフォノンによって散乱されるためにドップラーシフトを受け、ちょうどフォノン周波数分だけ光の周波数がシフトする。この過程は、量子力学的にはフォノンの吸収・放出に伴う光（フォトン）エネルギーの増加・減少と捉えることもできる。この周波数変化量 ν_B をブリルアン周波数シフト（Brillouin frequency shift: BFS）と呼び、光ファイバ中では、

$$\nu_B = \frac{2nv_A}{\lambda} \quad \dots 2$$

で与えられる。ここで、 v_A は媒質中の音響フォノンの速度、すなわち音速である。BFSの値は、光の周波数（ $>10^{14}$ Hz）に対して極めて低く、光ファイバ中では一般にGHzオーダーである。

また、フォノンの寿命は有限であるため、光とフォノンの相互作用時間はこの寿命によって制限される。その結果、散乱光の周波数は寿命の逆数に比例した広がりをもつことになる。よって、散乱光のスペクトルを測定し、周波数シフトと広がりを調べることで、フォノンの周波数と寿命を求めることができる。

散乱光のスペクトルは、第1図のように3つのピークをもつ形となる。中央、すなわち入射光の周波数に現れる成分(R)はレイリー散乱成分で、光ファイバを含む媒質に本質的に存在する屈折率の揺らぎ（光の波長に比べて十分小さいスケールでのランダ



第1図 散乱光スペクトルの模式図

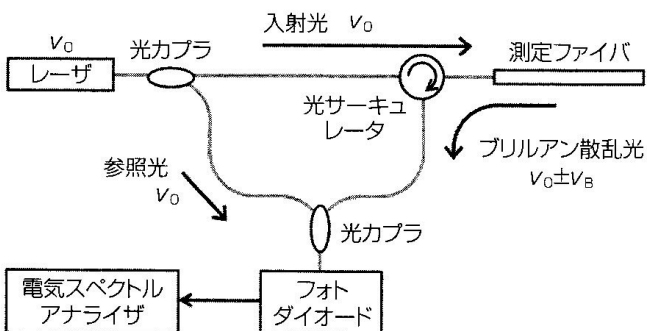
ムな密度・組成揺らぎなど)に起因する。中央を挟んで左右対称に現れる2つのピークが音響フォノンによるブリルアン散乱成分であり、中心より低周波側のピーク(S)をストークス成分、高周波側のピーク(AS)をアンチストークス成分と呼ぶ。

光ファイバは光の透過量を極限まで高めた光伝送路であるが、光を入射すると、このような散乱光が光ファイバのいたるところから戻ってくる。

2-2 測定手法

従来用いられてきたファブリペロ分光系によるブリルアン散乱測定では、周波数分解能を向上させるために様々な工夫がなされたにも関わらず、数10 MHz程度がその限界であった。これに対し、光ヘテロダイン法(光ビート分光法)を用いることで、非常に高い周波数分解能でのブリルアン散乱測定が実現できる。本手法は、散乱光に周波数が既知である参照光を混合し、これにより生じる光ビート信号のスペクトルを電子機器によって分析するもので、kHz以下の高い分解能での測定が可能である。

光ヘテロダイン法によって光ファイバ中のブリルアン散乱スペクトルを測定する実験系の例を第2図に示す。光源としては単色性の良い半導体レーザーな



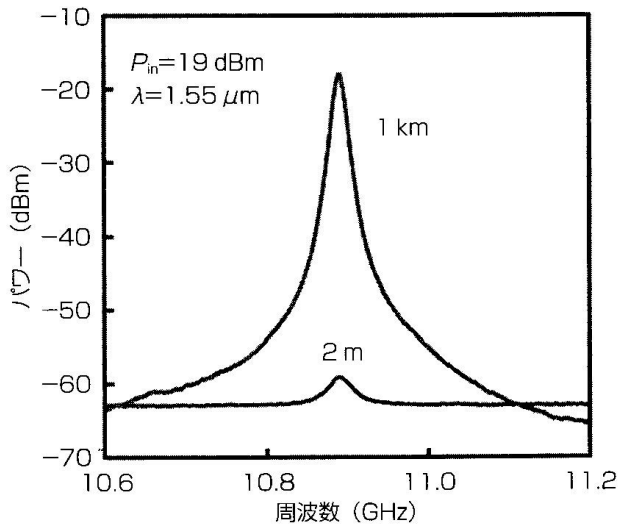
第2図 ブリルアン散乱測定系

どを用いる。一般に光学デバイスが充実している通信波長帯(1.55 μm など)を用いることが多い。レーザーの出力光は光カップラにより入射光と参照光に分岐される。入射光は光サーキュレータを通じて測定ファイバに入射される。周波数がBFS分だけシフトしたブリルアン散乱光は光サーキュレータにより入射光とは異なる経路を進み、光カップラにより参照光と混合され光ビート信号をつくる(「自己ヘテロダイン検波」と呼ぶ)。これを高速なフォトダイオードにより電気信号に変換し、電気スペクトルアナライザで観測すれば、ブリルアン散乱スペクトルが得られる。光ヘテロダイン法では参照光とブリルアン散乱光の周波数差のみに注目するため、レーザー周波数のドリフトは問題とならない。

第2図の実験系で、ストークス成分とアンチストークス成分を分離して観測したい場合は、参照光の周波数を音響光学変調器などでシフトさせればよい。また、信号対雑音比の高いブリルアン散乱測定を行うため、多くの工夫が提案されている。例えば、入射光や参照光をエルビウム添加光ファイバ増幅器などで増幅する、ブリルアン散乱光と参照光との相対的な偏波状態を偏波コントローラや偏波スクランブラの導入により調整する、ブリルアン散乱光に含まれるレイリー散乱成分を狭帯域光フィルタで抑制する、入射光あるいは参照光にチョッピングを施しロックインアンプを用いて信号を検出する、などが挙げられる。

2-3 測定の実例

長さの異なる2種類(2 mおよび1 km)のシリカ単一モード光ファイバに、波長1.55 μm 、パワー19 dBm(=80 mW)の光を入射したときのブリルアン散乱スペクトルを第3図に示す。偏波状態は最適化した。BFSは、ファイバ長に関わらず10.9 GHz程度であった。一方、ピークパワーは1 kmのときの方が2 mのときよりも40 dB(10000倍)以上高かった。これはファイバ長の違い(500倍)だけでは説明できず、自然散乱から誘導散乱(ある閾値よりも高いパワーをもつ光を入射すると、大部分がブリルアン散乱光として戻ってくる現象⁽³⁾)への遷移に起因するものである。また、ピークの半値全幅もファイバ長に大きく依存し、1 kmのファイバでは15 MHz、2 mのフ



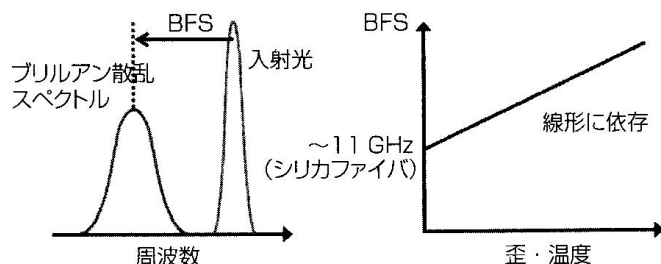
第3図 シリカ単一モード光ファイバ中のブリルアン散乱スペクトルの例

ファイバでは60 MHzであった。一般に、ファイバ長が長いほど、また入射光パワーが高いほど、線幅は狭くなることが知られている⁽⁴⁾。

2-4 歪・温度依存性

ブリルアン散乱特性、特にBFSは、第4図に示すように、光ファイバに印加された歪（ひずみ；伸びのこと）や温度変化にほぼ線形に依存する。これは、光ファイバ中の音速を決定するヤング率や密度、屈折率が歪や温度に依存するためである。この性質を用いれば、測定したBFSを光ファイバに印加されている歪・温度の情報に読み替えることができる。これがブリルアン散乱を用いた歪・温度センシングの基本原則である。

BFSおよびその歪・温度に対する依存係数は、光ファイバの種類により大きく異なる。例えば、1.55 μm帯において、シリカ光ファイバではそれぞれ10.9 GHz、+580 MHz/%、+1.18 MHz/K⁽⁵⁾⁽⁶⁾であるのに対し、テルライト光ファイバでは7.9 GHz、-230 MHz/%、-1.14 MHz/K⁽⁷⁾、プラスチック光ファイバでは28 GHz、-122 MHz/%、-4.09 MHz/K⁽⁸⁾⁽⁹⁾など



第4図 歪・温度センシングの原理

と報告されている。依存係数の絶対値が大きいほど高感度な測定が可能であることから、例えば、プラスチック光ファイバはシリカ光ファイバよりも歪の影響を受けにくく高感度な温度センサへの応用可能性があるといえる。

3. 分布型歪・温度センサへの応用

3-1 分布型光ファイバセンサ

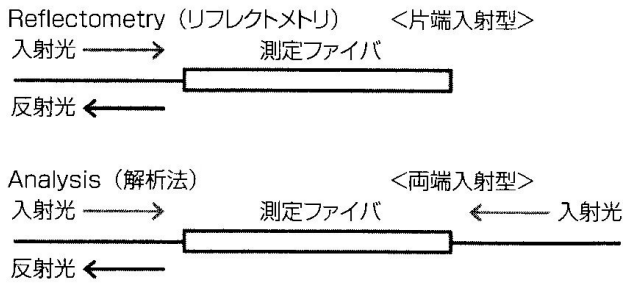
近年、航空機の翼やビルの内壁、ダムや橋梁など、多様化する構造物に光ファイバを埋め込み、その経年劣化や地震による損傷などを監視するシステムの重要性が高まっている⁽¹⁰⁾。そのため、光ファイバに沿った任意の位置で歪の大きさや温度を測定できる「分布型光ファイバセンサ」を実現しようと種々の取り組みが行われている。中でも、散乱光の強度情報を利用するレイリー散乱やラマン散乱を用いたセンサは安定性・精度が比較的低いため、周波数情報を利用するブリルアン散乱に基づいた分布型センサの研究が精力的に推進されている。

光ファイバ中のブリルアン散乱を用いた分布型センサは、測定ファイバの片端からのみ光を入射する「リフレクトメトリ（反射計測）」と両端から光を入射する「解析法」の2種類に大別される。解析法では、対向伝搬する光の相互作用に基づく誘導散乱への遷移（ポンプ・プローブ法）により比較的大きなブリルアン散乱信号が得られるのが利点であるが、測定ファイバ中が一箇所でも破断してしまうだけでその全体が測定不能になってしまうという欠点がある。一方、リフレクトメトリには、構造物への埋め込みが容易かつ測定中にある部分が破断してもその箇所までは正しく測定を継続することができるという利点があるが、一般には誘導散乱を用いることが困難である（自然ブリルアン散乱に基づく）ためブリルアン散乱信号が微弱となるのが欠点である。このように、リフレクトメトリと解析法は一長一短であり、計測対象に応じて使い分ける必要がある。

また、リフレクトメトリと解析法は、それぞれ位置分解手法によってさらに細かく分類される。これまでに、時間領域法、周波数領域法、相関領域法の3種類の手法が提案されている。

3-2 時間領域法

光パルスを入射すると、測定ファイバの各位置か



第5図 リフレクトメトリと解析法

異なる時間でブリルアン散乱光が戻ってくる。例えば、入射端付近からの散乱光は短時間で戻ってくるのに対し、遠くからの散乱光はその距離を光が往復する時間だけ遅れて戻ってくる。すなわち、光パルスを入射してから散乱光が戻ってくるまでの時間情報を距離情報に読み替えることができる。この位置分解手法が時間領域法であり、第6図のように測定ファイバの片端のみから光を入射する構成を「ブリルアン光時間領域リフレクトメトリ (BOTDR)」⁽¹¹⁾、第7図のように測定ファイバの両端から光を入射する構成を「ブリルアン光時間領域解析法 (BOTDA)」⁽¹²⁾と呼ぶ。

時間領域法では、空間分解能（2つの領域が2つと認識可能な最短距離）は入射する光パルスの幅に比例するため、基本的にはパルス幅を短くすることで高い空間分解能を得ることができる。しかし、パルス幅が短すぎるとブリルアン散乱スペクトルの線幅が広がり、ピーク周波数（すなわちBFS）の検出が困難になる。その結果、温度や歪の測定精度が劣化するため、基本的な実験系ではパルス幅をある程

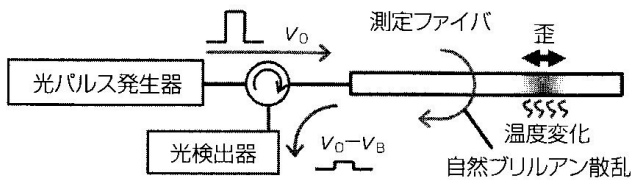
度以下には短くすることができない。そのパルス幅の限界は超音波（音響フォノン）の緩和時間である10 ns程度であり、対応する空間分解能の限界は1m程度であるといわれている⁽¹³⁾。しかし、パルス・ブリルアンポンプ方式⁽¹⁴⁾、ダブルパルス方式⁽¹⁵⁾、ダークパルス方式⁽¹⁶⁾など、パルス形状を工夫したり、ブリルアンダイナミックグレーティングという新現象を利用⁽¹⁷⁾したりすることでこの限界を打破する取り組みが進んでおり、これまでにcmオーダの空間分解能が実現されている。

基本的な実験系では、数多くの光パルスを入射してその散乱光を積分するため、測定には数分以上の時間がかかる。しかし、ブリルアン散乱スペクトルのスロープを利用するなどして、すでに実時間測定が実現されている⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。

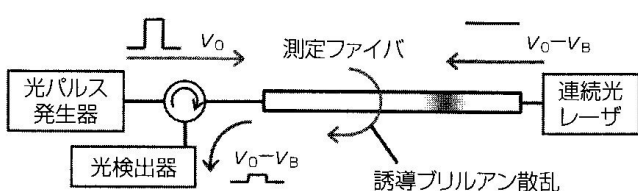
3-3 周波数領域法

測定ファイバに入射する光の周波数を掃引して周波数応答を計測し、その結果を逆フーリエ変換することで歪や温度の分布を得る手法が周波数領域法である。これまでに、第8図のように測定ファイバの両端から光を入射する「ブリルアン光周波数領域解析法 (BOFDA)」⁽²⁰⁾のみ動作が実証されており、片端から光を入射する「ブリルアン光周波数領域リフレクトメトリ (BOFDR)」については概念の提示はなされているものの、これまでに動作報告はない。

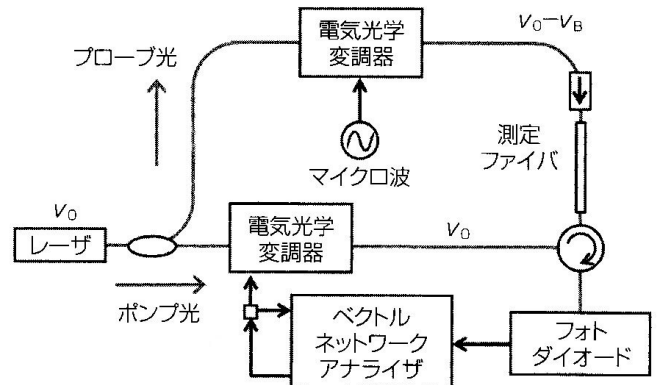
BOFDAは、ベクトルネットワークアナライザなどの高価な機器が必要となり、信号処理のため測定時間も長くなる傾向にある。しかし、空間分解能を高くしてもブリルアン散乱スペクトルの線幅が広がらないという利点を持ち、これまでにcmオーダの



第6図 BOTDRの模式図



第7図 BOTDAの模式図



第8図 BOFDAの模式図

分解能が実現されている²¹⁾。

3-4 相関領域法

連続光の相関（コヒーレンス）を制御して位置分解を実現するのが相関領域法²²⁾である。第9図のように測定ファイバの片端のみから光を入射する「ブリルアン光相関領域リフレクトメトリ（BOCDR）」²³⁾と、第10図のように測定ファイバの両端から光を入射する「ブリルアン光相関領域解析法（BOCDA）」²⁴⁾が報告されている。

相関領域法では、レーザの出力光の中心周波数に変調周波数 f_m で正弦波変調を施す。BOCDAの場合、レーザの出力光をポンプ光とプローブ光に分岐させ、両光を測定ファイバ中で対向伝搬させる。プローブ光の中心周波数は、電気光学変調器を用いて ν_B だけ下げしておく。すると、測定ファイバ中には、両光の周波数差が時間的に変動しない（両光の時間平均的な相関が高い）箇所が生じる一方、それ以外の領域では両光の周波数差は時間的に変動する（両光の時間平均的な相関が低い）。ここで、相関が高い箇所を「相関ピーク」と呼ぶ。いま、光周波数は正

弦波変調されているので、相関ピークは周期的に立ち並び、その間隔は変調周波数 f_m に反比例する。これを利用し、測定ファイバ中にただ一つだけ相関ピークが立つように f_m を制御すれば、相関ピークに対応した位置での誘導ブリルアン散乱信号のみが抽出できる。さらに f_m を掃引することで、相関ピークを測定ファイバに沿って移動させ、ブリルアン散乱スペクトルやBFSの分布情報を得ることができる。BOCDRの場合も同様に、測定ファイバ中の特定の位置のブリルアン散乱信号のみを参照光とのビート信号として抽出することができる。

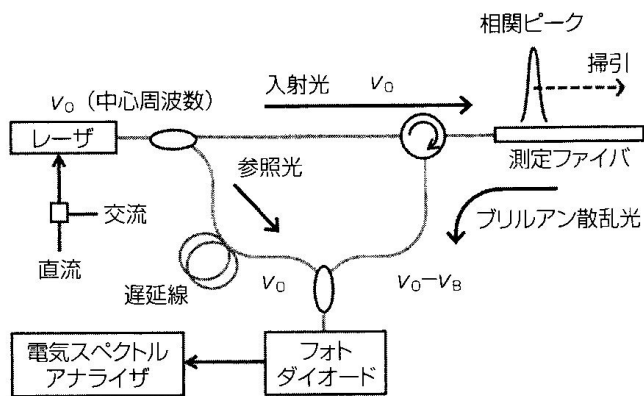
相関領域法は、mmオーダの極めて高い空間分解能と実時間測定が両立可能という大きな利点をもつ²⁵⁾。しかし、基本的な実験系では、測定レンジが隣接する相関ピーク間の距離に制限され、空間分解能と測定レンジがトレードオフの関係にあるという欠点をもつ。そのため、時間ゲート法²⁶⁾や二重変調法²⁷⁾によって、この制限を緩和する取り組みが進んでいる。また、BOCDAでは、実験系が複雑になること、高価な機器が多数必要であることも問題とされ、ポンプ・プローブ時分割発生方式²⁸⁾など、システムを簡素化する研究も進んでいる。

4. おわりに

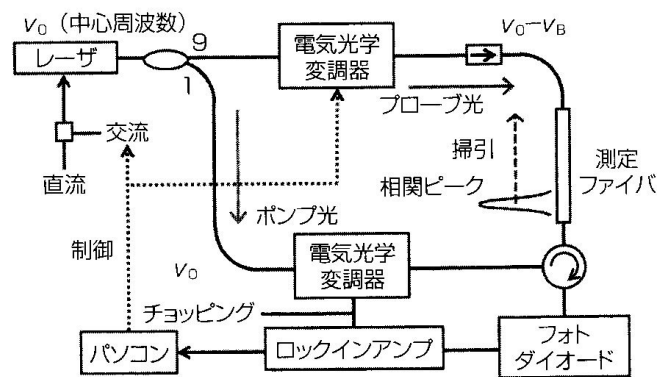
本稿では、光ファイバ中のブリルアン散乱の基本特性や測定法、測定の実例を解説するとともに、これを利用した種々の方式の歪や温度の分布センサを紹介した（呼称を第1表にまとめた）。これらの分布測定技術はそれぞれ独自の長所・短所をもつため、一概にどれが優れているとはいえず、測定対象や用途に応じて使い分けるべきである。それぞれの技術は実用化に向けて日々進化しており、近い将来、人間生活に安全・安心をもたらすコア技術としての貢献が期待される。

第1表 ブリルアン散乱を用いた分布型光ファイバセンサの呼称 Brillouin optical \blacksquare -domain \square (BO \blacksquare D \square)

		位置分析手法 (■)		
		Time	Frequency	Correlation
光入射 (□)	Reflectometry (片端)	BO \blacksquare DR	BO \blacksquare FR	BO \blacksquare CR
	Analysis (両端)	BO \blacksquare DA	BO \blacksquare FA	BO \blacksquare CA



第9図 BOCDRの模式図



第10図 BOCDAの模式図

<参考文献>

- (1) R.Y.Chiao, C.H.Townes and B.P.Stoicheff : "Stimulated Brillouin scattering and coherent generation of intense hypersonic waves", *Phys. Rev. Lett.* **12**, 592 (1964)
- (2) E.P.Ippen and R.H.Stolen : "Stimulated Brillouin scattering in optical fibers", *Appl. Phys. Lett.* **21**, 539 (1972)
- (3) G.P.Agrawal : *Nonlinear Fiber Optics* (Academic Press, 1995)
- (4) A.Yeniay, J.M.Delavaux and J.Toulouse : "Spontaneous and stimulated Brillouin scattering gain spectra in optical fibers", *J. Lightwave Technol.* **20**, 1425 (2002)
- (5) T.Horiguchi, T.Kurashima and M.Tateda : "Tensile strain dependence of Brillouin frequency shift in silica optical fibers", *IEEE Photon. Technol. Lett.* **1**, 107 (1989)
- (6) T.Kurashima and M.Tateda : "Thermal effects on the Brillouin frequency shift in jacketed optical silica fibers", *Appl. Opt.* **29**, 2219 (1990)
- (7) Y.Mizuno, Z.He and K.Hotate : "Distributed strain measurement using a tellurite glass fiber with Brillouin optical correlation-domain reflectometry", *Opt. Commun.* **283**, 2438 (2010)
- (8) Y.Mizuno and K.Nakamura : "Experimental study of Brillouin scattering in perfluorinated polymer optical fiber at telecommunication wavelength", *Appl. Phys. Lett.* **97**, 021103 (2010)
- (9) Y.Mizuno and K.Nakamura : "Potential of Brillouin scattering in polymer optical fiber for strain-insensitive high-accuracy temperature sensing", *Opt. Lett.* **35**, 3985 (2010)
- (10) K.Hotate : "Fiber sensor technology today", *Jpn. J. Appl. Phys.* **45**, 6616 (2006)
- (11) T.Kurashima, T.Horiguchi, H.Izumita, S.Furukawa and Y.Koyamada : "Brillouin optical-fiber time domain reflectometry", *IEICE Trans. Commun.* **E76-B**, 382 (1993)
- (12) T.Horiguchi and M.Tateda : "BOTDA - Nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: theory", *J. Lightwave Technol.* **7**, 1170 (1989)
- (13) A.Fellay, L.Thevenez, M.Facchini, M.Nikles and P.Robert : "Distributed sensing using stimulated Brillouin scattering : towards ultimate resolution", *Tech. Dig. Opt. Fiber Sens.* **16**, 324 (1997)
- (14) L.Che-Hien, T.Tsuda and K.Kishida : "PPP-BOTDA method to achieve cm-order spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique", *Tech. Rep. OFT* (IEICE, 2005)
- (15) Y.Koyamada : "Proposal and simulation of double-pulse Brillouin optical time-domain analysis for measuring distributed strain and temperature with cm spatial resolution in km-long fiber", *IEICE Trans. Commun.* **E90-B**, 1810 (2007)
- (16) A.W.Brown, B.G.Colpitts and K.Brown : "Distributed sensor based on dark-pulse Brillouin scattering", *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17**, 1501 (2005)
- (17) K.Y.Song and H.J.Yoon : "High-resolution Brillouin optical time domain analysis based on Brillouin dynamic grating", *Opt. Lett.* **35**, 52 (2010)
- (18) Y.Peled, A.Motil, L.Yaron and M.Tur : "Slope-assisted fast distributed sensing in optical fibers with arbitrary Brillouin profile", *Opt. Express* **19**, 19845 (2011)
- (19) J.Urricelqui, A.Zornoza, M.Sagues and A.Loayssa : "Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation", *Opt. Express* **20**, 26942 (2012)
- (20) D.Garus, K.Krebbber, F.Schliep and T.Gogolla : "Distributed sensing technique based on Brillouin optical-fiber frequency-domain analysis", *Opt. Lett.* **21**, 1402 (1996)
- (21) R.Bernini, A.Minardo and L.Zeni : "Distributed sensing at centimeter-scale spatial resolution by BOFDA : measurements and signal processing", *IEEE Photon. J.* **4**, 48 (2012)
- (22) K.Hotate : "Fiber distributed Brillouin sensing with optical correlation domain techniques", *Opt. Fiber Technol., chnol.* **19**, 700 (2013)
- (23) Y.Mizuno, W.Zou, Z.He and K.Hotate : "Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR)", *Opt. Express* **16**, 12148 (2008)
- (24) K.Hotate and T.Hasegawa : "Measurement of Brillouin gain spectrum distribution along an optical fiber using a correlation-based technique-proposal, experiment and simulation", *IEICE Trans. Electron.* **E83-C**, 405 (2000)
- (25) K.Y.Song, Z.He and K.Hotate : "Distributed strain measurement with millimeter-order spatial resolution based on Brillouin optical correlation domain analysis", *Opt. Lett.* **31**, 2526 (2006)
- (26) Y.Mizuno, Z.He and K.Hotate : "Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on temporal gating scheme", *Opt. Express* **17**, 9040 (2009)
- (27) Y.Mizuno, Z.He and K.Hotate : "Measurement range enlargement in Brillouin optical correlation-domain reflectometry based on double-modulation scheme", *Opt. Express* **18**, 5926 (2010)
- (28) K.Hotate and T.Yamauchi : "Fiber-optic distributed strain sensing system by Brillouin optical correlation domain analysis with a simple and accurate time-division pump-probe generation scheme", *Jpn. J. Appl. Phys.* **44**, L1030 (2005)

【筆者紹介】

水野 洋輔

東京工業大学 精密工学研究所 極微デバイス部門
助教

中村 健太郎

東京工業大学 精密工学研究所 極微デバイス部門
教授