

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 12 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630180

研究課題名(和文) 機能性流体でコアを充填した光ファイバによる電磁界分布センシング技術の開発

研究課題名(英文) Development of Distributed Electromagnetic Field Sensors Using Hollow-Core Optical Fibers Filled With Functional Fluids

研究代表者

水野 洋輔 (Mizuno, Yosuke)

東京工業大学・科学技術創成研究院・助教

研究者番号：30630818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：まず、毛細管現象を用いて中空コア光ファイバの内部を電気粘性流体で満たすことに成功した。次に、実験系の感度を向上させた上で、そのブリルアン散乱(微弱な音波による散乱)の信号を直接観測しようと試みたが、光伝搬損失が極めて高いために成功しなかった。そこで、ブリルアン散乱特性を間接的に推定するために、パルス-エコー法により電気粘性流体中の音速を測定する実験系を構築した。これを用いて、電気粘性流体中の音速や粒子濃度依存性、電界強度依存性を測定した。以上により、電気粘性流体中のブリルアン散乱の観測を電磁界の分布型センシングまで発展させるための土壌を整えたといえる。

研究成果の概要(英文)：First, we succeeded in filling the core of the hollow-core optical fibers with an electrorheological fluid (ERF) by use of a capillary phenomenon. Subsequently, we made an attempt to detect the Brillouin scattering (caused by weak acoustic waves) signal in these fibers directly using a sensitivity-improved measurement setup, but the optical propagation loss in the ERF was found to be too high for the signal to be detected. We then developed a setup for measuring the acoustic velocity in the ERF using a pulse-echo technique to indirectly calculate its Brillouin scattering properties. Using this setup, we measured the acoustic velocity of the ERF and its dependence on particle concentrations and on electric field intensity. Thus, we have laid the foundation of distributed electromagnetic field sensing using Brillouin scattering in the ERF.

研究分野：光ファイバセンサ、計測光学、非線形光学、光電子工学

キーワード：光ファイバセンサ 機能性流体
ブリルアン散乱 電気粘性流体 音速測定 電磁界計測 超音波計測 毛細管現象

1. 研究開始当初の背景

(1) 長い光ファイバに沿った任意の位置で物理量を測定できる「分布型光ファイバセンサ」は、安心・安全のため、我々をはじめ、世界中で精力的に研究がなされている。その主な原理には、高感度測定を可能とするブリルアン散乱が用いられてきたが、測定対象は歪や温度に限られていた。光ファイバが電磁界の影響をほとんど受けないという性質は、これまで「電磁ノイズの影響を受けない」としてセンサ応用上の利点の一つであるとされてきた。しかし、それ故、光ファイバ中のブリルアン散乱を用いて電磁界そのものを計測しようという取り組みは、国内外を問わず報告されていない。近年、電磁界の人体や医療機器への影響が危惧されており、電力設備や電子機器が発生する電磁ノイズを正しく評価するために電磁界の分布計測の重要性は飛躍的に高まっている。

(2) 我々は、これまでに、一般的なシリカガラス光ファイバのみならず、プラスチック光ファイバや希土類元素添加光ファイバなどの特殊ファイバ中のブリルアン散乱を初観測し、それら独自の利点を活かしたセンサ応用を提唱してきた。また、我々が所属する研究所の横田・吉田研究室(当時)との交流を通じ、印加した電磁界の強度に応じて粘度が制御できる機能性流体(電気粘性流体・磁気粘性流体)の存在やその有用性を学んだ。すでに、別テーマ(超音波モータの潤滑材としての利用)で電気粘性流体を用いた研究を推進している。このような背景の下、特殊光ファイバの一つである中空コア光ファイバに機能性流体を充填し、そのブリルアン散乱信号を用いれば、電磁界を計測することができるのではないか、という着想に至った。

2. 研究の目的

(1) 第一の目的は、中空コア光ファイバを電気粘性流体で充填する手法を確立することである。一般の光ファイバは、ゲルマニウム等のドーピング量を調整することで、コアの屈折率をクラッドの屈折率よりもわずかに高く設計し、中を伝搬する光が外側に漏れないような構造になっている。しかし、光を閉じ込めるには周期的構造(結晶構造)を用いる手法もあり、この原理に基づく光ファイバをフォトニック結晶ファイバ(PCF)と呼ぶ。PCFは屈折率差を利用しないためにファイバのコア部分にクラッドよりも屈折率の小さい空気等の物質を用いることができる。これが中空コア光ファイバであり、従来の光ファイバと比較して、低損失性・低非線形性・温度安定性など種々の利点をもつ。さらに、PCFの中空コアには任意のガスや液体などを毛细管現象等により注入することも可能であることが知られている。しかし、他グループで行われている取り組みは水・塩水・エタノール等の導入に過ぎず、機能性流体を導入し

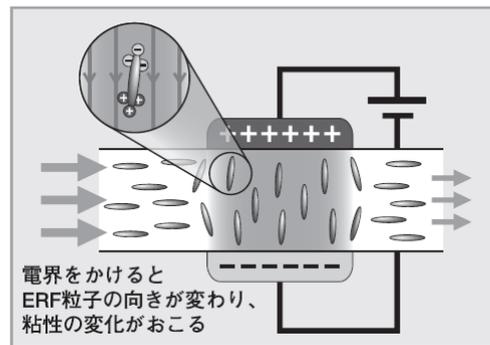


図1. 電気粘性流体の原理.

ようという発想は従来全く見られないものである。

(2) 第二の目的は、機能性流体を充填した中空コア光ファイバに外部から高パワーレーザー光を入射し、生じたブリルアン散乱光を観測すること、および、中空コア光ファイバに電磁界を印加し、その強度によってブリルアン信号の制御可能性を示すことである。外部から加える物理量(温度・光・電磁場など)を制御することによって、粘性や弾性などの物理化学的性質を機能的に変化させられる流体の総省が機能性流体である。多種の機能性流体が知られているが、本研究では電磁場によって粘度が変化する「電気粘性流体」(図1)および「磁気粘性流体」に注目する。これまで機能性流体は、動力伝達制御やアクチュエータ制御への応用を主目的として研究がなされてきた。しかし、電磁界の印加による流体粘度の変化は、流体の硬さの変化および流体中の音速の変化を伴うと推測されるため、物体中の音速に大きく依存するブリルアン散乱特性も大きく変化すると考えられる。このように、機能性流体中のブリルアン散乱に着目することは、斬新であるのみならず理論的な整合性も高いといえる。

(3) 第三の目的は、入射するレーザー光をパルス化することによって時間領域で位置分解を行い、電磁界の分布型計測の動作を実証することである。従来の光ファイバセンサは、電磁界の影響を受けないことを強みと謳ってきた。しかし、その電磁界を計測したいというニーズには十分には応えられなかった。そこで、我々は上記アイデアの工学応用も推し進め、世界初の分布型電磁界センシングを実証することを最終目的に設定した。

3. 研究の方法

(1) 本研究ではまずは電気粘性流体に着目した。中でも、近年香港科技大学のグループにより発見された巨大電気粘性流体は本研究に適していると考えられ、彼らに材料提供を頂いた。中空コア光ファイバは高価なので、導波機能は有さないものの同様の構造を有するキャピラリーチューブを用いて基礎実験を行った。中空部分の内径の異なる数種類

のチューブを用意し、電気粘性流体を毛細管現象により注入した。各内径に対して液体の浸入距離の時間変動を測定した。

(2) 一般にブリルアン散乱特性は物質中の音速に大きく影響を受ける。そのため、電気粘性流体中の音速が印加された電場に対してどのように依存するかを調べることは、予め電気粘性流体中のブリルアン散乱特性を推測するのに有意義である。手法としては、以前に我々が開発した超音波のバースト波を用いた時間領域法を用いた。

(3) 巨大電気粘性流体中は光伝搬損失が高くブリルアン散乱が極めて微弱であると予想されるため、従来のブリルアン観測系では検出が困難である可能性が高い。そこで、従来の観測系にロックイン検波等の工夫を施し、測定感度を劇的に向上させる。その上で、実際に中空コア光ファイバ（あるいは、キャピラリーチューブ）を電気粘性流体で充填し、その中のブリルアン散乱信号を検出する。その後、印加電磁界強度に対する各種特性（周波数シフトやストークスパワー、線幅など）の依存性を明らかにし、センシング応用の可能性について検討する。

4. 研究成果

(1) まず、ブリルアン散乱の観測系を高性能化することに成功した。この内容は、別の科研費（研究課題 25709032）のメインテーマでもあるので、ここでの詳述は省く。これを用いて、巨大電気粘性流体を充填したキャピラリーチューブのブリルアン散乱を直接観測しようとしたが、成功しなかった。原因は、巨大電気粘性流体中の極めて高い光伝搬損失にあると考えられる。そこで、現在、香港科技大学のグループに依頼し、光伝搬損失を低減した材料開発を進めて頂いている。

以下では、光ファイバ中のブリルアン散乱に基づく電磁界分布センサ実現のための第一歩として、室温における電気粘性流体の音速、および、その粒子濃度依存性を調査した内容について記述する。

(2) 粒子分散系の巨大電気粘性流体を採用し、質量パーセント濃度の異なる4種類のサンプル ($\gamma = 44, 47, 50, 66 \text{ wt}\%$) を準備した。巨大電気粘性流体中の音速の測定系を図2に示す。内径6 mm、高さ11 mmの円柱状の容器にサンプルを注入した。波形発生器を用いて矩形パルス電圧（ピーク電圧10 V、繰り返し周波数100 Hz、duty比0.3%）を発生させ、超音波振動子Aに印加した。発生した超音波は巨大電気粘性流体中を伝搬し、容器底面に達すると、振動子Bにより電圧出力となった。その後、ローパスフィルタ（遮断周波数1.59 MHz）を施し、オシロスコープで観測した。

超音波が振動子Bに最初に届くまでの時間 t_a は、巨大電気粘性流体や容器底面の内部で

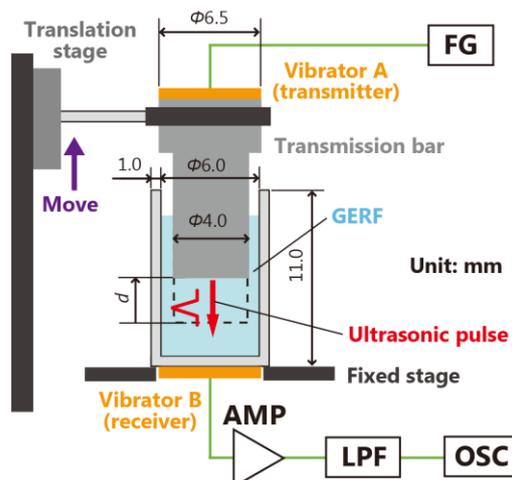


図2. 電気粘性流体中の音速測定の実験系。

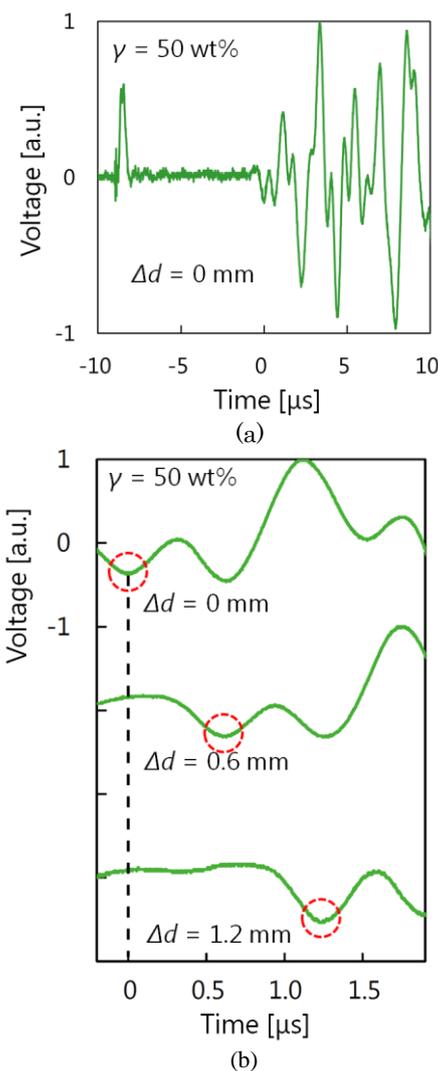


図3. (a) 濃度 $\gamma = 50 \text{ wt}\%$ の巨大電気粘性流体を用いた場合の、振動子Aの相対位置 $d = 0 \text{ mm}$ のときの広域波形. (b) $d = 0, 0.6, 1.2 \text{ mm}$ のときの $t = 0 \mu\text{s}$ 付近の拡大図。

生じる多重反射の影響を受けない。よって、振動子Aの相対位置 d を変化させながら t_a を測定することで、巨大電気粘性流体中の音速を $\Delta d / \Delta t_a$ として算出することができる。予備実験として室温での水中の音速を5回測定

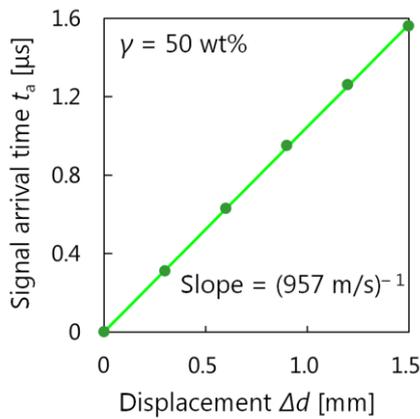


図 4. 振動子 A の相対位置 d の増加に伴う到達時間 t_a の依存性.

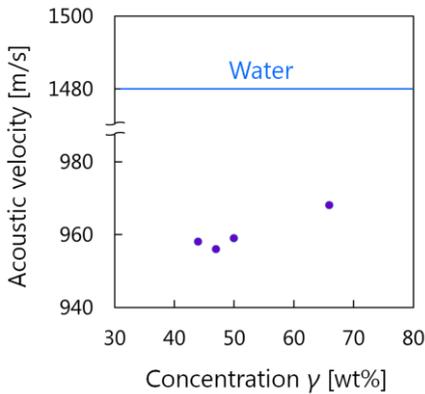


図 5. 室温における巨大電気粘性流体中の音速の濃度依存性.

したところ、 $1,480 \pm 2$ m/s の値が安定して得られた。この値は文献値とも一致するため、本手法が適切であることが確認された。

(3) 次に、室温において、濃度 $\gamma = 50$ wt% の巨大電気粘性流体を用いたときの結果を述べる。振動子 A の相対位置 $d = 0$ mm のときの広域波形を図 3(a)に示す。巨大電気粘性流体を透過した超音波に起因する信号が最初に到達した時間を $t = 0$ と定義した。時間 $t = -8.5 \mu$ s のピークは、振動子 A に印加したパルス電圧が電磁結合したものである。 $d = 0, 0.6, 1.2$ mm のときに $t = 0 \mu$ s 付近の拡大図を示したのが図 3(b)である。 d の増加に伴い到達時間 t_a が遅れていることが分かる。 d に対する t_a の依存性を図 4 に示す。依存性は線形であり、その傾きの逆数から音速は 957 m/s と計算された。これは、水中の値 (~ 1480 m/s) の約 2/3 である。

濃度 $\gamma = 44, 47, 66$ wt% の巨大電気粘性流体サンプルについても同様に音速測定を行った。室温における巨大電気粘性流体中の音速の濃度依存性を図 5 に示す。濃度と音速の間には大きな相関は見られなかったが、 ± 2 m/s 程度の測定誤差を考慮すれば、濃度の増加に伴って音速も増加する傾向にあるといえる。一般に固体中では液体中よりも音速は高いため、溶媒中に分散している粒子の濃度

が増加することで巨大電気粘性流体中の音速が増加するのは妥当である。なお、巨大電気粘性流体の溶媒であるシリコンオイル中の音速は、組成によって 900–990 m/s 程度の範囲の値となることが知られている。今後、溶媒のみのサンプルを入手し音速を測定することで、上記の傾向が正しいことを確認する予定である。

(4) 上記の実験で構築した実験系は、電気粘性流体中の音速を高速かつ高精度に測定できるという特徴を有する。これを用いて、農工大のグループと共同で、イモゴライト（円筒状粘土鉱物）による刺激応答性ハイドロゲル中の音速、およびそのゾル-ゲル転移中の変化を測定した。本結果は、刺激応答性ハイドロゲルのゾル-ゲル転移のメカニズム解明に直結すると期待される。

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 40 件)

- ① Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Fukuda, and K. Nakamura, “Single-end-access distributed strain sensing with wide dynamic range using higher-speed Brillouin optical correlation-domain reflectometry,” Jpn. J. Appl. Phys., 査読有, 掲載確定.
- ② Y. Mizuno, H. Ujihara, H. Lee, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Polymer optical fiber tapering using hot water,” Appl. Phys. Express, 査読有, 掲載確定.
- ③ K. Minakawa, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Cross effect of strain and temperature on Brillouin frequency shift in polymer optical fibers,” J. Lightwave Technol., 査読有, 掲載確定. DOI: 10.1109/JLT.2017.2689331
- ④ H. Lee, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry using polymer optical fibers with high propagation loss,” J. Lightwave Technol., 査読有, vol. 35, no. 11, pp. 2306-2310 (2017). DOI: 10.1109/JLT.2017.2663440
- ⑤ N. Hayashi, Y. Mizuno, K. Nakamura, S. Y. Set, and S. Yamashita, “Experimental study on depolarized GAWBS spectrum for optomechanical sensing of liquids outside standard fibers,” Opt. Express, 査読有, vol. 25, no. 3, pp. 2239-2244 (2017). DOI: 10.1364/OE.25.002239
- ⑥ Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Fukuda, K. Y. Song, and K. Nakamura, “Ultrahigh-speed distributed Brillouin reflectometry,” Light: Sci. Appl., 査読有, vol. 5, e16184 (2016). DOI: /10.1038/lsa.2016.184
- ⑦ H. Lee, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Operation of slope-assisted

- Brillouin optical correlation-domain reflectometry: Comparison of system output with actual frequency shift distribution,” *Opt. Express*, 査読有, vol. 24, no. 25, pp. 29190-29197 (2016). DOI: 10.1364/OE.24.029190
- ⑧ H. Lee, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Slope-assisted Brillouin optical correlation-domain reflectometry: proof of concept,” *IEEE Photon. J.*, 査読有, vol. 8, no. 3, 6802807 (2016). DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2562512
- ⑨ N. Hayashi, H. Lee, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Observation of backward guided-acoustic-wave Brillouin scattering in optical fibers using pump-probe technique,” *IEEE Photon. J.*, 査読有, vol. 8, no. 3, 7100707 (2016). DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2550321
- ⑩ Y. Mizuno, N. Hayashi, H. Tanaka, Y. Wada, and K. Nakamura, “Brillouin scattering in multi-core optical fibers for sensing applications,” *Sci. Rep.*, 査読有, vol. 5, 11388 (2015). DOI: 10.1038/srep11388
- ⑪ K. Minakawa, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Thermal memory effect in polymer optical fibers,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 査読有, vol. 27, no. 13, pp. 1394-1397 (2015). DOI: 10.1109/LPT.2015.2421950
- ⑫ Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Fiber-optic interferometry using narrowband light source and electrical spectrum analyzer: influence on Brillouin measurement,” *J. Lightwave Technol.*, 査読有, vol. 32, no. 24, pp. 4132-4138 (2014). DOI: 10.1109/JLT.2014.2365187
- ⑬ M. Ding, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Discriminative strain and temperature measurement using Brillouin scattering and fluorescence in erbium-doped optical fiber,” *Opt. Express*, 査読有, vol. 22, no. 20, pp. 24706-24712 (2014). DOI: 10.1364/OE.22.024706
- ⑭ N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Simplified configuration of Brillouin optical correlation-domain reflectometry,” *IEEE Photon. J.*, 査読有, vol. 6, no. 5, 6802807 (2014). DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2361638
- ⑮ N. Hayashi, K. Minakawa, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Brillouin frequency shift hopping in polymer optical fiber,” *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, vol. 105, no. 9, 091113 (2014). DOI: 10.1063/1.4895041
- ⑯ Y. Mizuno, S. Ohara, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Ultrasonic splicing of polymer optical fibres,” *Electron. Lett.*, 査読有, vol. 50, no. 19, pp. 1384-1386 (2014). DOI: 10.1049/el.2014.1224
- ⑰ G. Numata, N. Hayashi, Y. Mizuno, and K. Nakamura, “Ultra-sensitive strain and temperature sensing based on modal interference in perfluorinated polymer optical fibers,” *IEEE Photon. J.*, 査読有, vol. 6, no. 5, 6802306 (2014). DOI: 10.1109/JPHOT.2014.2352637
- [学会発表] (計 118 件)
- ① Y. Mizuno, H. Lee, N. Hayashi, K. Nakamura, and S. Todoroki, “Plastic optical fiber fuse and its impact on sensing applications”, 25th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-25), paper Th-X3, Jeju, Korea, April 24-28, 2017 <invited>.
- ② Y. Mizuno, H. Lee, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Brillouin scattering in plastic optical fibers and its applications to high-speed distributed sensing”, 6th Asia-Pacific Optical Sensors Conference (APOS 2016), paper Tu3A.1, Shanghai, China, October 11-14, 2016 <invited>.
- ③ Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Brillouin light scattering in plastic fibers,” Asia Communications and Photonics Conference 2014 (ACP 2014), paper AW4D.2, Shanghai, China, November 11-14, 2014 <invited>.
- ④ Y. Mizuno, N. Hayashi, and K. Nakamura, “Distributed strain and temperature sensing based on Brillouin scattering in plastic optical fibers,” 23rd International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS-23), paper 9157-678, Santander, Spain, June 2-6, 2014 <invited>.
- ⑤ 水野洋輔、邱惟、皆川和成、林寧生、中村健太郎, “電気粘性流体中の音速測定: 光ファイバ型電界分布センシングの実現に向けて”, 2016年(平成28年)春季第63回応用物理学関連連合講演会, 20p-P5-11, 東京工業大学(東京都・目黒区), 2016年3月19日-22日.
- ⑥ 敷中一洋、邱惟、皆川和成、李熙永、林寧生、水野洋輔、中村健太郎, “剛直円筒状無機高分子からなるチクソトロピー性ゲルにおける超音波音速”, 高分子学会高分子ゲル研究会第28回高分子ゲル研究討論会, paper 17, 東京大学(東京都・文京区), 2017年1月16日-17日.
- [その他]
ホームページ等
<http://www.nakamura.pi.titech.ac.jp/ymizuno/>
6. 研究組織
(1) 研究代表者
水野 洋輔 (MIZUNO, Yosuke)
東京工業大学・科学技術創成研究院・助教
研究者番号: 30630818