

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：12612

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820303

研究課題名(和文) 高分子光ファイバーのフォトルミネッセンスを利用した応力及び応力方向センサーの開発

研究課題名(英文) Development of a fiber-optic stress-direction sensor using fluorophore-doped polymer optical fiber

研究代表者

古川 怜 (Furukawa, Rei)

電気通信大学・情報理工学(系)研究科・准教授

研究者番号：50589695

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)：光ファイバー応力センサーは、インフラのヘルスマonitoringに有効とされる技術である一方、これら既存のセンサーシステムは、応力のかかる方向までは検知できない。本研究では、応力のかかる方向を検知できる光ファイバー応力センサーの開発を目指した。その原理は以下の通りである。ファイバーのコア(光が閉じ込められ伝搬する中央芯部分)に色素を添加することにより、応力により色素を配向させ、それを出力光へ反映させる。結果として、線形性などに課題は残すものの、仮説に矛盾しない応力方向依存性を観察した。

研究成果の概要(英文)：Fiber-optic sensing of stress direction was attempted using dye-doped polymer optical fiber. The former fiber-optic strain sensors do not have this function. The sensing mechanism is as follows. 1) Molecular orientation of dye was induced by the stress applied to the fiber. 2) Linearly polarized light was coupled to the fiber. 3) Output light intensity changes depending how well the polarization plane matches the molecular orientation. As a result, changes in output intensity as a function of stress direction was observed using the fabricated fiber and proposed measurement system.

研究分野：材料工学

キーワード：光ファイバー 歪センシング 蛍光体

1. 研究開始当初の背景

光ファイバー応力センサーは、ファイバーに印加された応力に応じて出射光が変化する仕組みを光配線に付与した物である。既存の光ファイバー応力センサーは、戻り光の波長シフトを検出する方式を主流とし、これらは応力の強度とその位置が特定できることから構造物のヘルスマonitoringに有効とされている[①]。その一方で、これらの既存センサーシステムは、応力のかかる方向までは検知できない。

2. 研究の目的

代表研究者らは、過去に分極異方性の相殺効果がある共重合体[②]をコアに適用したポリマー光ファイバーにおいて、偏波保持特性を確認した[③④]。本研究では、更にそのコアに構造異方性の顕著な蛍光低分子を添加したデザインの光ファイバーを提案/作製し、それを応力センシングに用いる手法を開発した。

上記「1. 研究開始当初の背景」に記載したように、応力のかかる方向を検知する機能は、既存の光ファイバー応力センサーには付与していない。このような新機能を実現するため、本研究では、光ファイバーのコア内に分散した発光低分子が応力によって配向する現象を応力方向検知に利用した。

その原理は以下の通りである。発光低分子を励起させる光を直線偏波状態にして光ファイバーに入射し、偏波面を回転させる。一般的に色素分子は π 共役系の広がりにより扁平な形をしており、その「面」と励起光振動面のなす角度に発光強度が依存する。このように、偏波面が色素の配向に合致する時に発光は最大となり、逆に直交した場合は最小となる。

本技術が開発されれば、建築物、自動車、航空機などの構造点検や破壊の事前予測において、応力のかかる「方向」についての情報が提供できるようになる可能性がある。このような、より詳しい応力についての解析が加わることで、事故および災害による倒壊などのリスクを低減することに繋がると考えた。

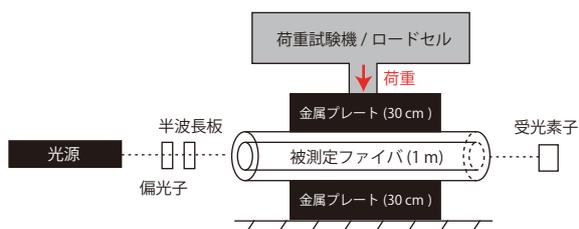


図1：応力印加実験系の模式図

3. 研究の方法

プリフォームを線引きする方式によりポリマー光ファイバーを研究協力者とともに作製した[⑤]。コアは、methyl methacrylate (MMA), benzyl methacrylate (BzMA), 2,2,2-trifluoroethyl methacrylate (3FMA)などの代表的な光学素子用ポリマー原料の共重合体とした。これらの混合比は、文献[②]を参考に複屈折が最小となるように組成を決定した。さらに、コアには発光低分子ロードミン 6G を 0.05 wt% 添加した。なお、実験に用いる材料の選定には、研究協力者による各物質の構造計算を参考にした。

得られた光ファイバーへの応力負荷実験により、応力方向の検知能力について検討を行った。評価系の模式図を図1に示す。1メートルの光ファイバーを直線状にし、荷重試験機で中央部分 30センチに応力を印加した。

光ファイバーへ応力負荷実験系の構築を研究協力者とともにに行った。応力印加部のレイアウトは、以下の条件を満たすようにした。

- 光ファイバーに接触し応力を伝える媒体が変形しない
- 負荷を何サイクルか増減させた際に、応力に対して再現的なひずみが見られる

入射光源はロードミン 6G の励起スペクトルに合致する 532 nm の He-Ne レーザーを中心に用いた。ファイバーに入射させる前に直線偏光とし、偏波の振動面と応力方向（重力方向）のなす角が垂直である時と水平である時での出射光強度の比較を行った。入射光束径はファイバーのコア径よりも小さく、クラッドへの入射は無い。ファイバーに加わる応力値を増減させ、それに伴う出射光の変化を中心に調査した。

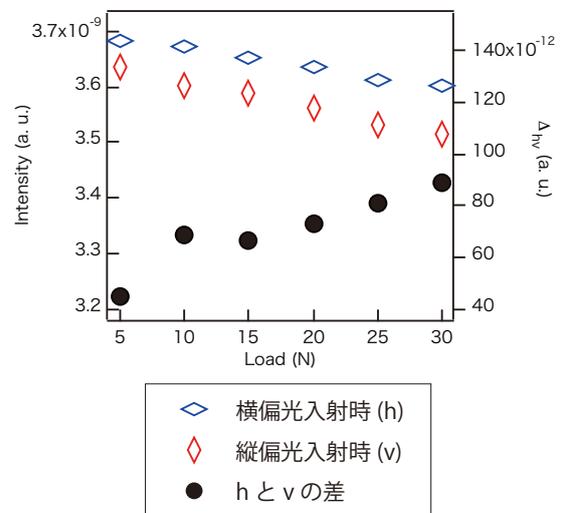


図2：光ファイバーへ印加した応力値と出射光強度の関係。横偏波（応力印加方向と垂直）および縦偏波（応力印加方向と平行）を入射した際について、それぞれの出射光強度と、その差をプロットした。

4. 研究成果

本研究で提案・作製を行った光ファイバーのセンサー特性を図2に示す。図中、まず注目すべきは横偏光入射時(h)と縦偏光入射時(v)で出射光強度が異なることである。30 Nまでの荷重において、hの方がvよりも高強度を示し、また、ファイバーへかかる応力が増すにつれその差が開く傾向を示した。応力がかかると発光低分子はその π 共役面が水平方向に広がるように配向することが推測される。この面に一致した偏波、すなわちhに対応する偏波は効率的に低分子を励起させるため、その逆の状況であるvに対して高強度を示した傾向は、仮説と合致したと言える。つまり、光ファイバーへ入射する偏波を回転させることにより、応力のかかる方向を特定することができたと言える。

次に注目すべきはh-v差の線形性である。図中、黒丸でプロットしたhとvの差分は、全体として線形的な上昇を見せた。従って、ファイバー内で起きる分子配向は、応力の増大とともに顕著化することが示唆された。

その一方で、この検量線から外れるようなデータ点も散見され、現構成ではセンサーとして、線形性および再現性の向上が求められる結果となった。この点については、研究代表者らが過去に行った円柱断面の応力分布についての検討[6]から、コア/クラッド比や蛍光低分子の濃度分布を最適化し、配向が起きやすい箇所によくの色素を分布させるなどの工夫が効果的と考える。

<引用文献>

- ① Branko Glisic and Daniele Inaudi, John Wiley & Sons Ltd., Fiber Optic Methods for Structural Health Monitoring, 2007.
- ② Akihiro Tagaya, Hisanori Ohkita, Tomoaki Harada, Kayoko Ishibashi, and Yasuhiro Koike, "Zero-Birefringence Optical Polymers," *Macromolecules* 2006, 39, 3019-3023.
- ③ R. Furukawa, A. Tagaya, S. Iwata, and Y. Koike, "Waveguiding Property of a Plastic Optical Fiber Fabricated Using Low-Birefringence Copolymer," *Japanese Journal of Applied Physics, Part 2: Letters*, Vol. 46, No. 47, ppL1182-L1184, 2007.
- ④ R. A. Furukawa, A. Tagaya, and Y. Koike, "Modal analysis of a multimode polarization-maintaining plastic optical fiber fabricated using poly(methyl methacrylate/benzyl methacrylate) copolymer," *Applied Physics Letters*, Vol. 93, No. 10, pp103303/1-3, 2008.
- ⑤ E. Nihei, T. Ishigure, N. Tanio, and Y. Koike, "Present Prospect of Graded-Index Plastic Optical Fiber in

Telecommunication," *IEICE Trans. Electron.*, E80-C (1) 117, 1997.

- ⑥ R. Furukawa, M. Nagata, K. Mishima, M. Matsuura, A. Inoue, and Y. Koike, "Core stress distribution of phase shifting multimode polymer optical fiber," *Applied Physics Letters*, vol. 103, pp. 213301, 2013.

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0件)

[学会発表] (計2件)

- ① 溝呂木 大地, 牧野 建志, 西村 亮一, 塚田 賢治, 二瓶 栄輔, 古川 怜「色素添加ポリマー光ファイバーの垂直応力下での出射光解析」第62回応用物理学会春季学術講演会 2015年3月13日(神奈川県平塚市).
- ② R. Furukawa, D. Mizorogi, K. Tsukada, E. Nihei, M. Matsuura, A. Inoue, A. Tagaya, and Y. Koike, "Stress-induced light leakage of Rhodamine 6G doped polymer optical fiber," 23rd International Conference on Plastic Optical Fibers (POF 2014), 2014年10月10日(神奈川県横浜市).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 光ファイバひずみゲージ, 光ファイバひずみセンサ, および光ファイバひずみセンシングシステム

発明者: 佐久間広貴, 金子浩樹, 松森正樹, 古川 怜

権利者: 同上

種類: 特許

番号: 特願 2014-204513

出願年月日: 平成26年10月3日提出

国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

<https://furugroup.wordpress.com/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川 怜 (FURUKAWA, Rei)

電気通信大学・情報理工学研究科・准教授
研究者番号: 50589695

(2) 研究分担者
該当なし

(3) 連携研究者
該当なし

(4) 研究協力者
森 勉 (MORI, Tsutomu)
防衛大学校
研究者番号：40016259

堀江 史郎 (HORIE, Shiro)
東京工業大学
研究者番号：90114892

二瓶 栄輔 (NIHEI, Eisuke)
慶應義塾大学・理工学部・専任講師
研究者番号：10228257

小池 康博 (KOIKE, Yasuhiro)
慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号：60161840

安藤 慎治 (ANDO, Shinji)
東京工業大学・理工学研究科・教授
研究者番号：00272667