

氏名（本籍）	松田 健太郎（茨城県）
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	甲第 244 号
学位授与の日付	令和 3 年 3 月 22 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	社会インフラのヘルスマonitoringに適用可能な光ファイバセンシングに関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 長瀬 亮 (副査) 教授 松井 伸介 准教授 徳永 剛 准教授 秋田 剛 慶應義塾大学 教授 石博 崇明

## 学位論文の要旨

### 社会インフラのヘルスマonitoringに適用可能な光ファイバセンシングに関する研究

高度経済成長期に整備された道路、橋梁、トンネルなどの社会インフラ設備は建設後 50 年経過したものが多く、インフラ設備の老朽化が問題視されている。国土交通省が所轄する社会資本は市町村管理の割合が多く、2018 年までに着手したインフラは約 20 %程度にとどまっている。修繕措置の遅れの要因として、市町村の土木部門の職員数と土木予算の減少、修繕費の負担増加が挙げられる。今後の維持管理・更新を事後保全方式で行った場合、2 倍以上の費用が必要となるため、老朽化対策を計画的・効率的に実施するための支援が必要となる。その支援の一環として、国土交通省は社会インフラに対して新技術の導入による長寿命化・コスト縮小を提言しており、光ファイバを用いたモニタリングが様々な場所で実用化に向けて研究されている。

光ファイバによるモニタリングシステムの中で入射光パルスに対するブリルアン散乱を活用した時間分布測定方式（Brillouin-OTDR : B-OTDR）や光ファイバコアに紫外光の干渉縞を照射して作製する Fiber Bragg Grating（FBG）センサを用いた測定系が既に用いられているが、測定装置側のコストが高いことやセンサの長期信頼性に不安があることから、広く普及しているとは言えない。

本論文では誘電体多層膜フィルタを装着した BOF センサによる AE 計測、標準 SMF を用いた簡易ひずみセンサの構造設計、および光ファイバ線路の保守点検用に用いられている安価な

Optical Time-Domain Reflectometer (OTDR)と分岐光線路を用いて多点分布測定が可能な常時モニタリングシステムの構築を行った。これら3項目について、以下に詳細を示す。

(1) 探傷技術として材料から発する弾性波 (Acoustic Emission : AE) をとらえる手法が挙げられる。AE とは材料が変形、き裂などが発生すると、材料内部に蓄積された歪みエネルギーが解放され、弾性波として放出され材料内を伝搬する現象である。誘電体多層膜を装着した光ファイバセンサ (Band-pass filter On Fiber-end : BOF) を用いて AE 波を測定するにあたって、AE 波は数 10 kHz 以上の周波数を発することが報告されていることから従来のピエゾ式 AE 波センサを用いた接触法による BOF センサの広帯域における周波数特性の調査を行った。また、材料評価として最も基本的な試験である三点曲げ破壊試験 (JIS A 1106 及び JIS K 7074) を用いてコンクリートと炭素繊維複合材の破壊による AE の検出を行い、AE に対する BOF センサの評価を行った。まず BOF センサの周波数特性は 1000 kHz まで検出することが可能であり、両者が発するであろう AE 波の周波数を捉えきえることを確認した。次にコンクリート及び炭素繊維複合材の 3 点曲げ破壊試験による AE 波検出ではそれぞれが発する AE を捉えていた。また炭素繊維複合材では破壊モードによって異なる周波数を発することが報告されていることから、静的な面外負荷及び単一モードの破壊による AE 検出を行った結果、それぞれが発する AE を捉えていた。落錘衝撃による AE 検出は約 50 kHz, 約 60 kHz, 約 200 kHz の波形が検出され、これらの周波数は炭素繊維複合材が樹脂割れ及び層間剥離を起こした際に発する AE 波であることを確認した。以上のことから BOF センサを用いて構造体の破壊における AE 検出が可能であることを確認した。

(2) 標準 SMF を用いた簡易ひずみセンサの構造設計では、曲げによる光損失を用いた光ファイバセンサの作製を検討した。光ファイバ型ひずみセンサを作製するにあたって、B6 光ファイバの曲げ損失、および曲げによる偏波依存性損失の特性を調査した結果、光損失は曲率半径が 3 mm 以下から偏波依存損失は極理半径 4 mm 以下より急増したことを確認した。これらの結果を踏まえ、光ファイバ型ひずみセンサの作製を行い、光損失、偏波依存損失の測定、有限要素解析による比較を行った。その結果試作した光ファイバ型ひずみセンサの荷重に対する光損失量は 10 N 時で 2.4 dB, 偏波依存損失は 0.1 dB 以下であり、有限要素解析との比較では非常に近い値を示すことを確認した。また、本ひずみセンサを金属試験片に貼り付けて引張試験を行った結果、約 100 □□ で 0.02 dB 程度と小さいが、ひずみ測定に対応できることから、モニタリングシステムに組み込みができることを示した。

(3) OTDR を用いた分岐光線路による遠隔保守監視の構築の実現を目指す。本研究で考案した OTDR を用いた分岐光線路における各線路の差分損失変動について、2 分岐光線路の経路ごとの損失変動や、分岐比量による各経路の損失変動の調整についてシミュレーションを行い、実際の分岐光線路を構築し各経路の損失変動の実験値と比較することで損失変動理論の妥当性を検証した。また、短経路側で得られる損失変動値は各経路の散乱光が含まれているため、実際の損失量

が不明である。そこで各経路で発生する損失量の特定および、4分岐光線路において各経路の損失変動をシミュレーションで検証した。その結果、2分岐光線路の経路において各経路の挿入損失に対しての差分損失変動の理論値と実測値が一致した。また、初期損失量や差分損失の変動によっては計算による誤差が大きくなるため、分岐比率による短経路側の最大損失変動量を調査し、短経路側に分岐量を増加させることで測定レンジの拡大が行えることから、必要な分解能に応じて分岐比に対する最適な設計を行う手法を見出した。

以上述べた通り、本論文では誘電体多層膜フィルタを装着したBOFセンサによるAE計測、標準SMFを用いた簡易ひずみセンサの構造設計、および光ファイバ線路の保守点検用に用いられている安価なOTDRと分岐光線路を用い、低コストに多点分布測定が可能な常時モニタリングシステムの提案を行い、基本性能を確認した。

## 審査結果の要旨

高度経済成長期にインフラ整備が整えられてから50年が経過し、各所で老朽化が目立ち始めている。また、少子高齢化により地方自治体のインフラに充てる予算や職員数は減少傾向にあり、建て替えや整備を行うにも時間がかかることから、半分以上のインフラ整備が耐久年度を過ぎても運用されており、それらの破損や崩壊を防ぐためには保守点検が必要不可欠である。笹子トンネル崩落事故を契機にインフラ設備の点検補修が本格的に行われており、地方自治体の土木部門の職員数や予算の減少に対して、計画的・効率的にインフラ整備を実施するため、広範囲の保守監視を行うことが可能な光ファイバセンサが提案されている。

コンクリート建造物の強度劣化を検査する方法の一つとして、破壊の前兆を捉えるAE (Acoustic Emission) 波測定の手法があるが、代表的な圧電素子の場合はセンサと測定器間の距離が限定される。また、ひずみを監視する光ファイバセンサとしてFBG (Fiber Bragg Gratings) が広く使われているが、その製造過程によりセンサの引張強度を保証することができないため、建造物のヘルスマニタリングに使用するには不安が残るとともに、反射波長の変化をセンシングする必要から装置が高価になる。信頼性を確保できる光ファイバ自体の局所的なひずみを計測可能なBOTDR (Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) も使われているが、装置が極めて高価である。一方、これまで試験運用されている光ファイバセンサの設置方式として主に使われているバス型は、単線路上から各箇所に分岐あるいは線路上に光ファイバセンサを配置し、複数の光ファイバセンサを使用できる利点があるが、単一線路であるため光ファイバが断線すると断線発生地点以降のセンサが使用できなくなる、途中の損失により遠方になるほど検出が困難になるなどの問題が挙げられる。

本論文では、地方自治体で導入しやすい安価な建造物ヘルスマニタリングシステムの構築を目指し、AE波検出が可能な安価な光ファイバセンサとその測定装置、および簡単なシステムで監

視が可能な簡易構造の損失変動型光ファイバひずみセンサについて提案している。また、断線に対して対応力のあるヘルスマonitoringを構築するのに最適な光ファイバセンサの配置方式として、分岐光線路によるツリー型配置方式を取りながら、分岐後の各光線路に発生した損失を識別できる新たな手法を編み出している。AE 波検出センサについては、これまで温度センサとして提案されており、製造過程で光ファイバの強度を劣化させる要因が無く、量産可能な構造を持つ誘電体多層膜フィルタ付きファイバ (Band-pass filter On Fiber-end: BOF) に着目し、AE 波の検出が可能であることを明らかにした。次にひずみセンサについては、強度が保証された光ファイバをそのまま使用し、単純な構造でひずみのセンシングが可能である新たな構造を考案し、ひずみの計測が可能であることを示した。最後にこれらのセンサがいずれも光パワーの変動をベースとして計測可能であることから、ツリー配置により 2 次元的なセンサネットワークを構成する新たなシステムを考案し、現在広く普及している光通信ネットワークで使用されている部品や汎用測定器を利用して安価に構成できるヘルスマonitoringシステムを提案している。

第 1 章では日本における社会インフラの保守監視状況について述べ、長寿命化計画の技術背景として、光ファイバセンサ及びネットワークを活用したモニタリングシステムの実例について概説した。第 2 章では、誘電体多層膜を用いた AE 波検出として、構造物が破壊する際に発生する弾性波 (AE 波) を検出するため、圧電型 AE センサとの相互校正法による BOF センサの周波数特性評価、及び建築物に多く使用されるコンクリート材料、新規部材として機械構造体に使用され始めた炭素繊維複合材を用いて破壊試験による AE 波検出が可能であることを示した。第 3 章では光ファイバ型ひずみセンサの構造創成として曲率変化による光ファイバ型ひずみセンサを製作し、荷重に対する光損失変化量を計測した結果をもとに、金属材料の引張りによるひずみ測定へ応用できることを示した。第 4 章では分岐光線路によってこれらのセンサを広域に監視するシステムとして、分岐後のレイリー後方散乱光の計算手法、理論値と実測値の比較、発生している光損失の算出方法について明らかにした。

以上、本研究は社会インフラのヘルスマonitoringに応用できる安価な光ファイバセンサとして、AE 波センサとひずみセンサを新たに考案し、その動作を確認するとともに設計手法を明らかにした。また、これらのセンサを 2 次元的に広域に配置しながら、安価な汎用測定器をベースに一元的に監視できる新たなシステム構成を考案し、その動作を実証することにより、老朽化が進む社会インフラの安全を低コストに確保できる技術を提案した。これらの技術的貢献は工学における学術論文として高く評価できる。

よって本論文は、博士 (工学) の学位論文として合格と認められる。