

## 審査の結果の要旨

氏名 和田 大地

近年、先進国を中心に進展しているインフラの老朽化、重大事故・自然災害によって構造物が破壊されることで引き起こされる社会的・経済的損失により、構造物の安全性・信頼性とそれを確保するための技術への関心が高まっている。なかでも、保守管理を高度化・充実化させ、構造物の寿命を安全に伸ばしていく技術が必要とされている。

土木構造物や航空機、船舶などにおいて構造的なコンディションをモニタリングし、損傷を検知したり、過大な荷重の作用を防いだりすることで、構造物の健全性を確保する手法が提案されている。特に、構造物に一体化されたセンサからの多量の情報を用いて、初期の損傷・劣化などの異常を検知しようとする構造ヘルスマモニタリングが注目を集めている。

構造ヘルスマモニタリングにおいて、構造物の健全性評価につながる一次情報を取得するためのセンシング技術は重要であり、精度・分解能、安定性、耐久性などに対して高い要求が課せられる。光ファイバセンサは、軽量、可とう性、高強度、耐食性、耐電磁誘導性、防爆性などの優れた特徴から、構造物のモニタリングのためのセンシング技術として注目されている。特に、光ファイバに沿ってひずみや温度の分布を測定できる分布型光ファイバセンサは、従来のセンサには実現が困難な特徴を有しており、構造物全体の変形状態および局所的な応力集中までも精度よく検出できる技術として盛んに研究・開発が進められている。本研究で対象とする光周波数領域反射計方式 (OFDR: Optical Frequency Domain Reflectometry) は、1mm以下の空間分解能での分布測定を可能とし、Fiber Bragg Grating (FBG) と組み合わせることで、光ファイバに沿ったひずみ、あるいは温度を高い精度で分布的に測定できる技術である。

OFDR方式によって高空間分解能と高精度を兼ね備えた分布型光ファイバセンサは、構造物のモニタリングで大きな威力を発揮できるが、実構造物への適用の際、外部からの影響により精度の信頼性が低下する。特にひずみの分布測定においては、温度の影響、また測定対象以外のひずみ成分の影響が無視できないことがある。さらに、応答性と高空間分解能は一般的に両立させることが難しく、動的な測定が課題となっている。そこで本研究では、OFDR方式の分布型光ファイバセンサの構造物のモニタリングへの適用性を向上させることを目的に、ひずみ・温度の分離測定技術、多軸ひずみ場の影響について検討するとともに、新たな信号処理方法による応答性の改善を試みた。そして、これらの検討を効率的に、かつ理論的に進めていくためのシミュレーションの開発を行った。

本論文は8つの章から構成される。

第1章は序論であり、光ファイバセンサの構造物のモニタリングへの適用性を向上させるための課題を明らかにし、本研究の目的を述べている。論文の構成も示されている。

第2章では、構造物のモニタリングを安全性・信頼性の観点から説明し、特に近年、構造物の信頼性向上技術として注目されている構造ヘルスマモニタリングの現状と課題を示し、モニタリング・センシング技術の適用性向上と妥当性の検証が課題であると指摘している。

第3章では、構造物のモニタリングにおいて注目されている光ファイバセンサについて、概略

を示すとともに、本研究で対象としているOFDR方式の分布型光ファイバセンサの原理や応用例について述べている。

第4章では、OFDR方式の分布型光ファイバセンサを対象に、「測定対象（構造物）の状態・変化」、「対象の状態・変化に伴うセンサの状態・変化」、「センサの状態・変化に対する測定器の応答・出力」、「測定器からの出力信号の集録・処理」と言ったセンシングプロセス全体をシームレスに再現するシミュレーションシステムを開発した背景とシミュレーションの解析モデルなどについて述べている。有限要素モデル、モード結合理論による光学系モデルなど既存のモデル・手法を中心としたシミュレーションであるが、多軸応力下のセンサ出力を計算するために、新たに偏波の変動を考慮できる計算方法を提案している。結果として、これまでの断片的なシミュレーションとは異なりセンシングプロセス全体を再現できるシステムの開発に成功し、その有効性は以下の章で示している。

第5章では、多軸ひずみ場でのOFDR方式の分布型光ファイバセンサの出力特性について検討を行っている。FBGを多軸ひずみ場においた場合、反射スペクトルが乱れることが知られているが、OFDRで観察される分布的な反射スペクトルにも同様の乱れが観察される。このことを実験と上述したシミュレーションにより確認した。偏波状態を考慮したシミュレーションで正確に再現されており、独自性・新規性の高い成果と言える。さらに、OFDR方式で観察される特殊なうなり現象と多軸ひずみ場との関係性を初めて明らかにし、それを利用した圧力の測定方法を提案している。また、光ファイバを多軸ひずみ場となる複合材料の接着・溶着継手部に埋め込み、分布測定を行った結果を示している。接着継手の例では、シームレスシミュレーションから得られる出力と実際の測定出力は、極めて高い一致を示しており、構造のモニタリングに対するセンシング技術の適用性をシミュレーションにより総合的に検証できることを示す成果である。逆に、溶着継手の例では差異が観測され、今後品質保証や解析モデルの改良に応用できる成果であると言える。

第6章では、分布測定におけるひずみと温度の分離測定技術について検討を行っている。ここでは偏波保持光ファイバに書きこまれたFBGを利用している。現状、分解能と精度において世界最高水準のひずみ・温度の同時分布測定と認められるが、実用的な面からは改善が求められる結果であるとして、改善のための提案がなされている。提案は偏波保持光ファイバそのものの改良であり、材料・構造的な知見と解析技術を駆使して光ファイバの最適化設計を行い、シームレスシミュレーションによって改善後の精度を推定している。センサ性能の向上化のために光ファイバ自身の改良・最適化を含めて検討した点には、高い独自性と新規性があると言える。

第7章では、FBGからの反射スペクトルの中心波長シフトを求めるために群遅延計算による信号処理方法を提案し、処理速度において従来の方法に比べ50倍の向上が見られた。また空間分解能も上がる事が認められた。

第8章は結論であり、本研究で得られた知見をまとめ、今後の展望が述べられている。

以上を要するに、本論文では、OFDR方式の分布型光ファイバセンサの構造のモニタリングに対する適用性を向上させるための課題について、提案・開発したシミュレーション技術を活かして総合的な検討が行われている。本研究により、構造物のモニタリングシステムを高度化する基盤的な技術進歩が得られている点は、システム創成学分野にとって大きな価値がある。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。