

## 審査の結果の要旨

氏名 劉慶文

本論文は、“Ultra-high Strain Resolution Optical Fiber Sensors for Geophysical Applications (地球物理研究用超高歪分解能光ファイバセンサ)”と題し、地球物理研究に必要とする超高歪分解能を有する光ファイバセンサの提案、理論解析と実証研究に関する成果をまとめたものであり、英語で書かれた全7章からなる。

第1章 Introduction では、地球物理研究にて地殻変動を観測する手法に関する研究背景を述べており、本論文の構成と目的を示している。従来、地殻変動を観測するためには、深層地下空間にて安定した環境で100メートルもの長さを要する変位計を複数台設置する必要があり、容易ではなかった。本研究の目的は、数cmから数十cmと小型でありながら、ナノストレイン (ne) 分解能を達成する光ファイバ歪センサ技術を確立させ、今までに無い精度と規模で地質活動のモニタリングを可能とし、地球科学と地震研究に貢献することにある。

第2章 Analysis on static strain FBG sensors interrogated by a narrow linewidth tunable laser では、光ファイバブラッググレーティング (FBG) を用いた超高分解能静的歪センサを提案し、FBGのスペクトル、レーザ光源の波長掃引誤差、測定系の雑音など歪分解能への制限要因を解析し、歪分解能に関する包括的な解析式を導出した。参照FBGと相互相関信号処理手法の導入により、ne分解能の実現が可能であることを示している。

第3章 Ultra-high static strain resolution FBG sensors for geophysical applications では、FBGを用いた超高分解能静的歪センサの室内実験とフィールド実証実験の結果を記している。室内実験では、2.6 ne という従来の光ファイバセンサより3桁も向上している歪分解能を得て、また、フィールドテストでは、世界で初めて光ファイバセンサを用いて、海洋潮汐による地殻変動の観測に成功している結果を報告している。

第4章 Static strain FFPI sensors with frequency modulation technology では、第2、3章で提案し実証したFBGセンサにおけるレーザの波長掃引幅と波長掃引誤差による制限を緩和し、分解能をさらに改善するとともに測定速度を

向上させることを目指して、新たに FBG ファブリ・ペロー干渉計 (FFPI) に基づいた超高分解能歪センサを提案した。レーザ光源の周波数変調技術とデジタル復調手法を用いて、レーザ周波数と FFPI 共振周波数のディチューニングを抽出し、5pm の狭いレーザ波長掃引幅で超高分解能を実現している。

第 5 章 FFPI sensors with sideband interrogation technology では、センシング FFPI と参照 FFPI を同時に計測するために、サイトバンド検出手法を発明し、レーザ掃引幅をさらに 0.1pm に縮小し、歪分解能を 0.3 ne まで向上した。さらに、レーザ周波数とサイドバンド周波数をそれぞれ参照 FFPI とセンシング FFPI にロックし、リアルタイムで超高分解能の歪センシングに成功したことを示している。実験では 0.05 ne の歪分解能と  $\square$ Hz の測定速度を実証した。

第 6 章 Multiplexed FFPI sensors using dual-modulating technology では、二重変調手法による超高分解能 FFPI 歪センサの多重化を述べた。二重変調の原理、復調のアルゴリズムと変調器のデザインを紹介している。この手法では、FFPI センサの位置情報を特定しながら、超高分解能で歪情報を得ることができると数値シミュレーションより示している。

第 7 章 Conclusion では、本論文で得られた結果のまとめと今後の展望を述べている。

以上のように本研究では、超高分解能 FBG センサの提案、理論解析と実証実験を行い、世界で初めて光ファイバセンサを用いてナノストレインの静的歪分解能を実現し、海洋潮汐による地殻変動の観測に成功した。さらに、FFPI センサにおいては、周波数変復調計測手法、サイトバンド変調および二重ロックによるリアルタイム計測手法、二重変調による多重化手法など一連の新しい技術の提案と実証を行い、歪分解能と測定速度を大幅に向上した。光ファイバセンシング技術の発展と地球科学・地震研究への応用に大きく寄与し、電子工学特に光センシング技術への貢献が大である。

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。