

審査の結果の要旨

氏名 呉奇

本論文は、「Development of High-sensitivity Optical Fiber Ultrasonic Sensing Systems for Structural Health Monitoring of CFRP Laminates (CFRP 積層板の構造ヘルスマモニタリングのための高感度光ファイバ超音波センシングシステムの開発)」と題し、6章より構成される。

第1章は序論であり、研究背景として、近年、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の様々な軽量構造物への実用化が進みつつあることが挙げられる。しかしその損傷進展過程は複雑であるため、あらかじめセンサを組み込んでおくことで簡便に状態を監視できる構造ヘルスマモニタリング (SHM) が注目されているが、その一つに、超音波ガイド波を用いた動的診断手法が挙げられる。現状ではそのセンサとして、圧電セラミックス PZT の素子が使用されているが、構造部材に組込むと、大ひずみ下での破断や電磁ノイズが問題となる。そのため、柔軟で破断強度が高く、耐環境性にも優れ、小型で組込みに適した光ファイバセンサを超音波受信に用いる研究が進んでいる。しかし、一般にファイバブラッググレーティング (FBG) センサが用いられているが、その感度は低く、高感度化と広帯域応答性の両立も難しい。そこで本研究では、位相シフト FBG (PS-FBG) を導入し、そのスペクトル中央に現れる鋭いピークを用いて、高感度と広帯域性の両立を図ることを試みた。

第2章では、まず、PS-FBG の光スペクトルとその超音波応答の数値シミュレーションを行い、通常の FBG と比べることで、超音波センサとしての優位性 (高感度と広帯域性) を示した。次に、PS-FBG センサは強い指向性を有するため、超音波の伝播角度と伝播距離に依存した感度分布を実験と理論に基づいて検証した。さらに、SHM に適した構造物への固定方法についても調べた。以上の実用的側面からの検討を行った後、PS-FBG に適した3種類のセンサシステムを考案し、その応用とともに次章以降に示した。

第3章では、まず、PS-FBG 直列型センサシステムを提案・構築した。これは、センサ用とフィルタ用の2個の PS-FBG のスペクトルの重なりがひずみによって変動することで、超音波を検知可能となる。実際にこのシステムでの応

答を、PZT センサでの応答と比較すると、十分な広帯域性を有することがわかった。また、MFC アクチュエータで CFRP 中に励起した超音波を受信したところ、ノイズ除去のためのデータ平均化が不要であり、感度が大きく向上していることが確認できた。ただし、衝撃荷重による大きなひずみでは、計測可能レンジを越えてしまうことが問題となることも明らかとなった。

第 4 章では、2 番目として、PS-FBG バランスドセンサシステムを提案・構築した。これは、チューナブルレーザからの狭帯域光を PS-FBG のスペクトルの傾斜部に合わせ、その透過光と反射光をバランスドフォトディテクタに入力することで、DC 成分とレーザ強度ノイズを打消し、AC 成分は 2 倍となり、高い S/N 比を実現可能となった。これは、微弱な AE 信号も計測できるレベルであるため、CFRP 積層板の引張負荷下や 3 点曲げ負荷下で実際に発生する損傷に伴う AE 信号の計測を試みた。その計測結果は PZT-AE センサによる結果と同傾向であり、また、PS-FBG による AE 計測は、損傷形態の推定や損傷位置同定への発展可能性を有することが示せた。

第 5 章では、3 番目として、PS-FBG 組込型ファイバリングレーザセンサシステムを提案・構築した。まず、理論数値シミュレーションによってシステムの応答を調べることで、温度変化や準静的ひずみ等の外乱が加わった場合でも、自己調整機能が働いて、ブラッグ波長の調整をしなくても計測を継続可能であることがわかった。しかも、PZT センサと比べて感度は 20dB 高く、6.5MHz まで安定して計測可能であることが実験で確認できた。ただし、計測波形の振幅が変動することや緩和振動が影響する点は、今後の改善点である。

第 6 章は結論であり、本研究の総括を述べるとともに、構築した 3 種類のシステムはそれぞれ特徴が異なるため、目的に応じてこれらのシステムを使い分けることが重要であることを示した。加えて、今後の課題についても言及した。

以上を要するに、本論文では、PS-FBG を超音波センサとして導入することで、これまで FBG センサでは達成不可能であった、PZT センサ以上の高感度と広帯域性を実現することに初めて成功しており、実際の CFRP 中の AE 信号も計測可能にした。加えて、外乱に対する自己調整機能を有したシステムも構築できた。これらのシステムは、ガイド波を用いた SHM の分野を大きく推進すると考えられ、さらに、これまでの PZT センサでは困難であった極限環境での AE 計測実験も実現可能にできる。したがって、材料の評価試験から構造物の信頼性向上まで、大きな波及効果をもたらすことが期待できる。

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。