

審査の結果の要旨

氏名 于豊銘

本論文は、特殊環境下での負荷試験において複合材料中の損傷進展挙動をリアルタイムで把握することを目的として、光ファイバセンサにより遠隔でアコースティックエミッション(AE)を正確に取得可能な新規AE計測法を構築し、さらに、炭素繊維強化プラスチック(CFRP)複合材の曲げ荷重下でのAE信号から、ラム波伝播挙動に基づいてAE発信源の損傷形態を同定する手法を提案したものである。

第1章は序論である。研究背景として、高温環境等の特殊環境にも複合材料の実用化が進みつつあるため、その特殊環境下においても複合材料特有の複雑な損傷進展挙動を把握することが望まれている。材料試験中の損傷発生をリアルタイムで検出する手法としてAE法が挙げられるが、特殊環境試験に適用するためには金属製のウェーブガイドが必要となり、AE波形を正確に計測することができない。そこで本研究では、耐環境性に優れた光ファイバセンサで特殊環境下でのAE波形を正確に計測する手法を提案する。近年、位相シフト fiber Bragg grating (PSFBG)をセンサに用いたPSFBG バランスドセンシングシステムが開発され、その高感度・広帯域応答性能によりAE計測が実現できているので、本章にて、その光ファイバセンサシステムについて説明した。

第2章では、まず、PSFBGセンサにアニーリング処理を施すことで、1000°Cまでの耐熱性を有する再生FBG(RFBG)センサを形成し、高温環境下に直接RFBGセンサを設置してAE信号を計測することを試みた。しかしながら、RFBGセンサはその形成過程でひずみ計測の感度が低下しているため、超音波計測は可能であるが、AE計測には適用困難であることがわかった。

そのため第3章にて、PSFBGセンサ部は環境槽から離れた室温環境下に配置し、石英ガラス製光ファイバ自身をウェーブガイドに使用して、特殊環境下に置かれた試験片に光ファイバを接着する、新たな遠隔AE計測法を考案した。そして、糸状の柔軟な光ファイバをウェーブガイドに用いることで正確なAE波形を遠隔で取得できることを、実験と有限要素解析によって検証した。その結果、試験片を伝播してきたAEラム波は光ファイバ接着点において糸状の光ファイバを伝わる純粋な縦波と横波に変換され、さらに、光ファイバの中心軸にあるPSFBGセンサで縦波のみが選択的に受信されることで、遠隔で設置されたPSFBGセンサでも正確なAE波形を計測できることが明らかとなった。

第 4 章では、この遠隔 AE 計測法の高温環境への適用可能性を調べるため、長さ 30cm の光ファイバ・ウェーブガイドを 1100°C まで加熱した状態で、アルミ板に圧電素子で励起したバースト波を遠隔で計測することを試みた。その結果、光ファイバを 1100°C で 8 時間加熱し続けても、900kHz バースト波の受信波形に変化は生じなかった。さらに、ペンシルリードブレイクで発生させた模擬 AE 信号についても、高温環境で正確に計測できた。よって、光ファイバ・ウェーブガイドは、長時間にわたる高温環境での材料試験における AE 計測にも十分に適用可能であることがわかった。

第 5 章では、本計測法で AE 信号のひずみ波形を広帯域にわたって正確に取得できることを活かして、AE 信号からその損傷形態を推定する手法の構築を試みた。まず、CFRP 直交積層板に対して三点曲げ試験を実施したところ、トランスバースクラック、層間剥離、繊維破断の 3 種類の損傷形態が観察された。そこで、これらの損傷による AE 信号に対してウェーブレット変換を実施することで、損傷形態とラム波モードとの関連性を明らかにした。その関連性に基づき各 AE 波形から、 A_0 モードに対する S_0 モードの振幅比で定義した E/F 比とピーク周波数の 2 種類のパラメータを算出して、2 次元データで表現した。そして全 AE イベントの 2 次元データセットに機械学習を適用した結果、それらの AE イベントを 3 種類の損傷による AE 信号に分類することができた。これは、ラム波モードの発生挙動に基づいた、物理的な信頼性に優れた同定手法であると考えられる。

第 6 章では、さらに本手法の多機能化を図るため、AE 波形に含まれる複数のラム波モードの群速度差を利用することで、単独の PSFBG センサで計測した AE 波形から、材料試験中の損傷発生位置を推定する位置標定法を提案し、実験により、その有効性を検証できた。

以上を要するに、本論文では、光ファイバセンサの特徴を生かすことで、1100°C の高温環境に適用可能な遠隔 AE 計測法を構築し、さらにこの手法を用いて計測した AE 波形から、複合材料における内部損傷形態の同定と損傷の位置標定を行なう方法を確認することができた。本手法は、特殊環境下での複合材料の負荷試験における損傷進展挙動を把握可能にする新規 AE 計測法であり、先進複合材料の開発から構造物の信頼性評価まで大きく貢献し得る。

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。