

論文の内容の要旨

論文題目 光ファイバセンサを用いた遠隔AE計測法に基づく
複合材料中の損傷評価

氏 名 于 豊銘

航空機の燃費向上を図るため、軽量かつ高性能な複合材料が機体構造に適用されつつある。特に、炭素繊維強化プラスチック（CFRP）が胴体や翼等の一次構造に用いられ、さらに現在、エンジンのエネルギー変換効率の向上を目指して、耐熱性に優れた軽量なセラミックス基複合材料（CMC）の適用が期待されている。CMCは、母材のき裂をはじめとした、微視的かつ複雑な損傷が発生・累積することで破壊につながる。そのため、航空機エンジン用材料としての安全性を確保するためには、1000度を超える実使用環境下においてそれらの損傷発生過程を観察する必要があり、そのための計測法の構築が望まれている。その一つとして損傷の発生に伴うアコースティックエミッション（AE）の超音波成分を計測するAE検査法が挙げられる。しかし、圧電セラミックスPZT製のAEセンサは、耐用温度が一般に200度程度であるため用いることができない。そのため通常は金属製の導波棒を介して計測を行うが、その場合、導波棒でのモード変換により、受信波形が大きく異なったものとなる。その一方、光ファイバセンサの一種であるFBGセンサは、石英ガラス製で耐熱性に優れているので、高温環境下でのセンシング技術への適用が期待できる。特に本研究室では、FBGセンサの感度と応答帯域の向上を図るため、位相シフトFBG（PSFBG）の適用を試みてきた。これにより、今までのFBGセンサでは明確に計測できなかった微弱なAE信号まで計測可能となった。そこで本研究では、PSFBGセンサを用いて高温環境下でAE計測を試みる。

しかしながら、光ファイバのコアに周期的な屈折率変動を形成することで作製されたFBGは、900℃程度まで加熱していくと熱エネルギーによって消失する。そこで、PSFBGセンサに対してアニーリング処理を行い、1000℃までの耐熱性を有する再生FBG（RFBG）センサの形成を試みたが、その結果、超音波センサとしての感度は低下していた。この問題を解決するため、Fig. 1に示すように、石英製光ファイバの一点を試験片に接着して高温環境下に置き、PSFBGセンサを常温下に配置することで、試験片に発生したAE波を遠隔で計測する方法を考案した。この接着方法は遠隔計測用接着法（ADRM）と呼んでいる。ADRMを用いることで、PSFBGセンサは高温環境に曝されることなく、AE波を計測することが期待できる。

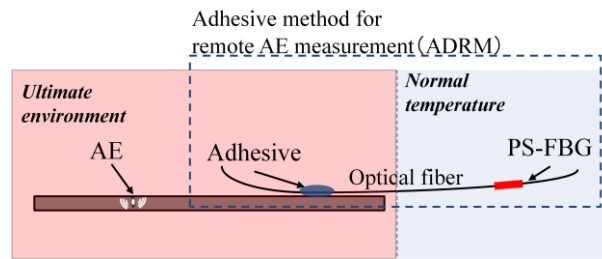


Fig. 1 Adhesive method for remote measurement.

そこで、高性能なPSFBGバランスドセンシングシステムをADRM構成に改良することで、極限環境下で適用可能なAE計測法を構築し、さらに、複合材料における損傷形態の同定手法など、AE計測法の高次機能を確立することを目的とする。

本研究で提案するADRM法では、AE波が光ファイバに沿ってセンサ部まで伝播する。この場合、金属製の導波棒と異なり、正確なAE波形を遠隔で計測できることを示す必要がある。そこで実験により、ADRM法におけるラム波モードの伝播挙動を調べた結果、ADRM法では、接着点におけるラム波を、正確な波形を保ったまま遠隔で計測できることがわかった。

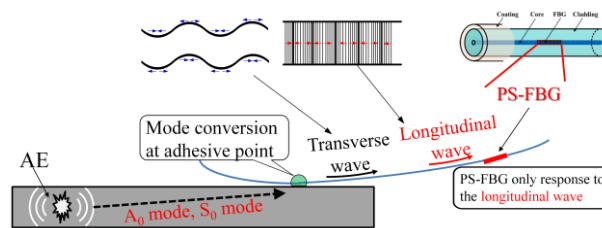


Fig. 2 Detection principle of PS-FBG sensor in the ADRM configuration.

さらに、三次元FEMシミュレーションを行うことによって解明した、遠隔AE計測法の計測原理をFig. 2に示す。アルミ板を伝わってきたラム波は、接着点で光ファイバに伝わる際に、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伝播する。そして、光ファイバの中心軸上での軸方向ひずみは縦波の成分のみが存在するため、光ファイバの中心軸にあるPSFBGセンサで受信されるモードは、光ファイバを伝わる純粋な縦波のみとなる。よって、接着点でのラム波は、その波形を保ったまま分散性の無い純粋な縦波としてPSFBGセンサまで届く。従って、遠隔で設置されたPSFBGセンサでも正確にAE波を計測できる。

さらに、石英ガラス製光ファイバは、1000°Cの高温環境でも安定した力学的特性を持つため、ADRM構成により、1000°Cの環境における模擬AE信号の計測にも成功した。しかも、長時間にわたって設置しても安定した性質を保持されることが確認できた。

本研究ではAE計測によって損傷発生イベントを検知するだけでなく、その計測AE信号から損傷形態を推定することも目的としている。今まで、AE計測に基づく損傷形態の同定は、圧電

セラミックスPZT-AEセンサにより試みられてきたが、PZT素子は、周波数に依存して異なる物理量（変位、速度、加速度）を計測する。そのため、弾性波理論によるAE信号の理論的解析というよりも、信号をパラメータ化した統計的な分析手法が主流となっている。よって、損傷形態の同定結果は、物理的な説明が困難である。それに対し、PSFBGセンサは、広帯域にわたるAE波を純粋なひずみとして計測するため、その計測波形から明確にラム波モードを分析可能である。このPSFBGセンサの特性を利用し、本研究では、AE信号をラム波理論で解析することで、的確に損傷形態を同定する手法を確立する。

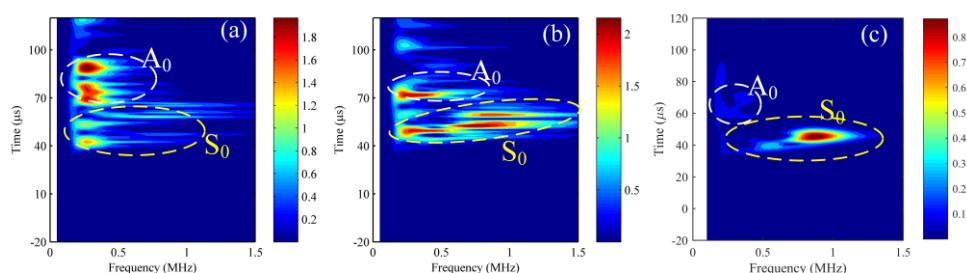


Fig. 3 Continuous wavelet transformation (CWT) results for waves detected by the PS-FBG sensor in the ADRM configuration: AE generated by (a) transverse crack, (b) delamination and (c) fiber break.

AE信号を取得するため、積層構成 $[90_2/0_2]_s$ のCFRP直交積層板に対して三点曲げ試験を行った。Fig. 3にはそれぞれ、トランスバースクラック、層間剥離、繊維破断によるAE信号のウェーブレット変換結果を示す。この結果より、3種類の損傷形態とラム波モードとの関連性を明らかにできた。外側の90度層中に発生したトランスバースクラックによるAE信号(Fig. 3 (a))では、 A_0 モードが S_0 モードより強い。これに対して、0度と90度との層間に発生した層間剥離によるAE信号(Fig. 3 (b))では、 S_0 モードが強い。さらに、繊維破断は積層板の中間層に存在し、かつ面内方向にAEを励起するため、そのAE信号(Fig. 3 (c))では A_0 モードより S_0 モードの方は遥かに大きくなっている。さらに、Fig. 3からわかるように、 S_0 モードが強くなるにつれて、AE信号のエネルギーは高周波数成分へ移動する。

以上のラム波モードと周波数分布の特徴から、AE信号の発信源の損傷形態を定性的に推定することができる。しかし、推定結果に物理的裏付けがある反面、信号解析に労力を要す。実際の複合材におけるAE計測では、大量なAEデータから損傷形態を同定する必要がある。そこで、いかに大規模のデータから的確かつ簡便に損傷形態を同定するかが課題となる。

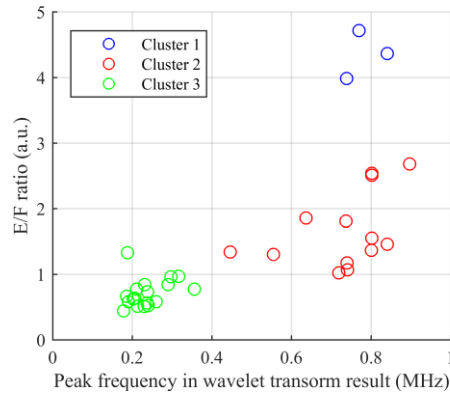


Fig. 4 Clustering result from AE signals detected by using PS-FBG sensor under three-point bending test.

そこで、モード間の強さ関係と周波数特性を、E/F比とピーク周波数といった特徴的な数値で評価し、AE信号をパラメータ化した。ここでは、E/F比は、 A_0 モードのウェーブレット変換係数の最大値に対する S_0 のウェーブレット変換係数の最大値の比で定義する。そして、ピーク周波数はウェーブレット変換結果において最大値が存在する周波数として抽出する。そしてAE信号をそれら2次元のデータで表現した。さらに、三点曲げ試験中に検出した全ての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(Fig. 4)、それらのAEイベントを、3種類の損傷によるAE信号に的確に分類できた。

これらのAE信号の発信源である損傷形態は、ラム波モードの挙動の相違に基づいて分類されたため、本研究で確立した同定手法は、物理的な信頼性に優れているといえる。それと共に、2次元データで表現したAE信号に機械学習を適用することによって、データ分析の高効率化も図れ、大規模なAE信号データセットを簡便に処理することが可能となった。よって本研究では、信頼性と実用性の高い、複合材料中に発生した損傷形態の同定方法を提案できた。

さらに、遠隔AE計測法の付加価値を高めるため、この手法を用いた損傷位置標定手法も考案した。この手法は、2個以上のセンサを使用する一般的な位置標定法とは異なり、単独センサで捉えた複数モードを利用することで実現できる。具体的には、ADRM構成におけるPSFBGセンサは、接着点におけるラム波モードをそのまま遠隔で計測できるため、群速度が異なる S_0 モードと A_0 モードの接着点での到達時間差を、1個のセンサによる計測結果から的確に抽出でき、損傷の位置と接着点との距離を推定可能にした。

以上、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、その方法を用いて、複合材料における内部損傷形態の同定や損傷の位置標定などの高次な機能も実現できた。従って、本手法は、特殊環境で使用される複合材料の信頼性を向上するための新規AE計測法として活用されることが期待できる。