

論文内容の要旨

論文題目

細径 FBG センサの不均一ひずみ分布応答を利用した複合材料の損傷検知システムに関する研究

氏名

水谷 忠均

近年、航空宇宙分野における炭素繊維複合材料(CFRP: carbon fiber reinforced plastic)の適用が増加している。CFRP は比強度、比剛性に優れた材料である。近年の航空分野においては、ボーイング社の B7E7、エアバス社の A380、宇宙分野においても極低温（例えば液体水素）推進剤タンクなどに CFRP が積極的に適用され、実用レベルにおいてもその需要の増加が顕著である。しかしながら、現在の構造設計では、CFRP の最終強度より低い応力レベルで生じる微視的損傷（樹脂クラック、層間剥離など）を許容しておらず、複合材料の特性を十分に生かした構造設計が行われていない。複合材料は微視的損傷後も、その損傷状態を的確に把握することができれば、十分に安全な運用が可能である。ゆえに、この微視的損傷状態を定量的に評価する構造ヘルスマニタリングシステムの構築は、複合材構造部材の損傷許容設計を可能にし、航空宇宙分野のみならず、あらゆる分野の構造設計において革新的な発展をもたらすことができる。

本論文では、光ファイバセンサによる複合材料の構造ヘルスマニタリングに関する研究を行った。光ファイバセンサについては様々なタイプのセンサが存在するが、ここでは FBG(fiber Bragg grating)、その中でも外径が 52 μm と非常に細い細径光ファイバ上に書き込まれた細径 FBG を適用した。光ファイバセンサは一般的に、小型、軽量、無誘導性などの特徴を持ち、耐環境性に優れたセンサである。細径光ファイバはこれらの特徴を持ちながら、さらに小型であるために、容易に複合材料中に埋め込むことが可能なセンサである。実際に、本論文ではこの細径 FBG を CFRP 積層板へ適用することを試み、損傷検知センサとして使用する技術を新規開発した。図 1 は、実際に細径光ファイバを CFRP クロスプライ積層板に埋め込んだ試験片の断面写真である。写真からわかるように、細径光ファイバの埋め込まれた周囲にも炭素繊維がきれいに回り込んで

いる。

この FBG がセンサ機能を持つのは、ひずみや温度変化に対して FBG が反射波長が変化する応答を利用したものである。FBG による健全性保証センサの研究例のうち、大多数がこのブラッグ波長の変化に注目したものである。しかしながら、複合材料の微視的損傷を検出することを考える場合、ブラッグ波長のシフトのみを測定するだけでは実現は難しい。なぜならば、微視的損傷周りでは応力集中によって不均一な応力場が発生し、ブラッグ波長が不規則に変化してしまうためである。また、積層板内部の損傷状態を推定する場合、ブラッグ波長はグレーティング区間内の平均的なひずみの影響を受けるため、定量的な評価は難しい。そこで、本論文では逆に不均一な応力場によって受ける影響を活用して、材料内に発生する微視的損傷を検出する手法を提案した。

まずは、不均一な 3 軸のひずみ分布に対する FBG の応答を解析する手法を提案した。本研究では、FBG の反射光解析にモード結合理論を適用した。そして、行列伝達法による近似解法を用いて、不均一なグレーティング特性を持つ FBG の解析手法を示した。この近似解法はグレーティングを N 個のセグメントに離散化し、セグメント内ではモード結合定数が均一であると仮定する。この場合、セグメント内ではモード結合方程式を解析的に解くことが可能になる。これによってセグメントの伝達行列を計算し、グレーティング全体がこの伝達行列の掛け合わせによって表現されることを示した。さらに、FBG がひずみ・温度の変化に対してどのような応答を示すか詳細な検討を行った。光弾性効果によって誘起される屈折率変化、および、ひずみそのものによる FBG の変形がブラッグ波長の変化に関連することを示した。この光弾性効果およびひずみによる FBG の変形を考慮した FBG の離散的解法を示した。また、FBG に非軸対称なひずみ成分が存在するときは複屈折が誘起され、独立した 2 つの偏波モードが存在することを示した。本研究では各偏波の前進波と後進波の結合のみを考え、偏波間の結合は考慮せず反射光強度をそれぞれのモードの重ね合わせでの解析することを示した。以上の理論的検討から、不均一な 3 軸のひずみ分布に対する FBG の解析手法を構築した。

この解析手法を適用して、積層板中に埋め込まれた細径 FBG が受ける、積層板の熱残留応力の影響を評価した。一方向性積層板に埋め込んだ場合は熱残留ひずみの非軸対称成分がほぼ 0 であり、反射光スペクトルの形状は変化せず、波長シフトのみが起こる。一方で、クロスプライ積層板の場合は、細径 FBG の非軸対称ひずみ成分が数百 $\mu\epsilon$ のオーダーで存在し、複屈折によるスペクトル形状の変化が無視できないことを示した。また、この複屈折の影響は光ファイバ被覆の物性値に大きく影響され、特に弾性率への依存性が高いことを示した。弾性率が高ければ複屈折効果は増幅され、低ければ減少する傾向にある。

次に、細径 FBG の不均一ひずみ分布に対する応答について数値解析を行った。3 次元の有限要素解析により、トランスバースクラックを 1 個有する CFRP クロスプライ積層板について、熱残留応力によるひずみ分布を計算した。ひずみ分布は、トランスバースクラック周りの応力集中の影響を受けて、不均一な分布を持つことを示した。先に述べた 3 軸の不均一ひずみ分布を考慮した FBG の反射光解析を行った結果、反射光スペクトルの形状が変化し、特に高波長側にスペクトル幅が広がる解析結果が得られた。また、トランスバースクラックの発生位置に対するセンサの感度を解析し、位置が端部を除くグレーティング範囲内ならば十分な感度があることを示した。

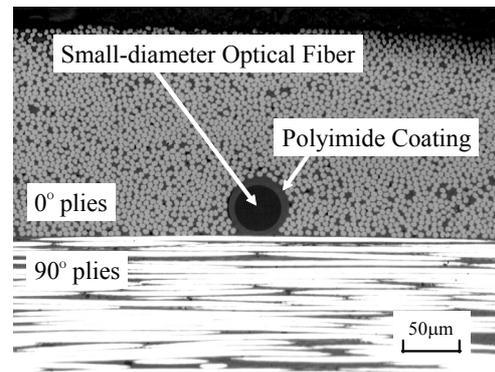


図 1 CFRP クロスプライ積層板中に埋め込まれた細径 FBG センサ

さらに、細径 FBG の被覆の物性値が不均一ひずみ分布に対する応答に及ぼす影響を解析した。弾性率が高いほど細径 FBG の反射率変化が大きいことがわかった。しかしながら、弾性率が低い場合でも細径 FBG のトランスバースクラックに対する感度は十分識別可能であることを示した。

これらの解析結果を実証するために、細径 FBG を埋め込んだ CFRP 試験片を作製し、まずは、成形時における反射光スペクトルの変化を計測した。この実験を可能にするために細径・通常径光ファイバの融着技術を開発し、実際にこの技術を利用して実験を行った。実験を行った結果、一方向材積層板については反射光スペクトルの形状が変化せず、波長シフトのみが起こることがわかった。また、クロスプライ積層板については、成形温度からの冷却時においてスペクトル幅が広がることがわかった。これらの実験結果からクロスプライ積層板中に埋め込まれた FBG には複屈折の影響が加わることを確認できた。

さらに、クロスプライ積層板の準静的引張試験を行い、細径 FBG によるトランスバースクラック検出を試みた。初期損傷の段階において、細径 FBG はトランスバースクラック発生と同時に瞬時的な応答を示した。また、荷重を除荷した状態でも損傷が検知できることを示した。損傷発生後の反射光スペクトルは先に示した解析手法によって計算された反射光スペクトルと非常によく一致した。解析結果を図 2 に実験結果とあわせて示す。この損傷検知手法を疑似等方積層板に適用したところ、同様の傾向が実験的に示された。以上の実験結果から、積層板中に埋め込んだ細径 FBG によるトランスバースクラックの検知が可能であると判断できる。

このトランスバースクラック検出手法を応用して、逆散乱法を利用したトランスバースクラック発生位置の同定手法を提案し、数値解析および実験を行った。ここでは、逆散乱法を離散化された FBG の解析モデルに適用し、モード結合定数を再構築する手法を示した。そして、再構築されたモード結合定数の位相項の空間微分が不均一なひずみ分布と関係していることを示し、そ

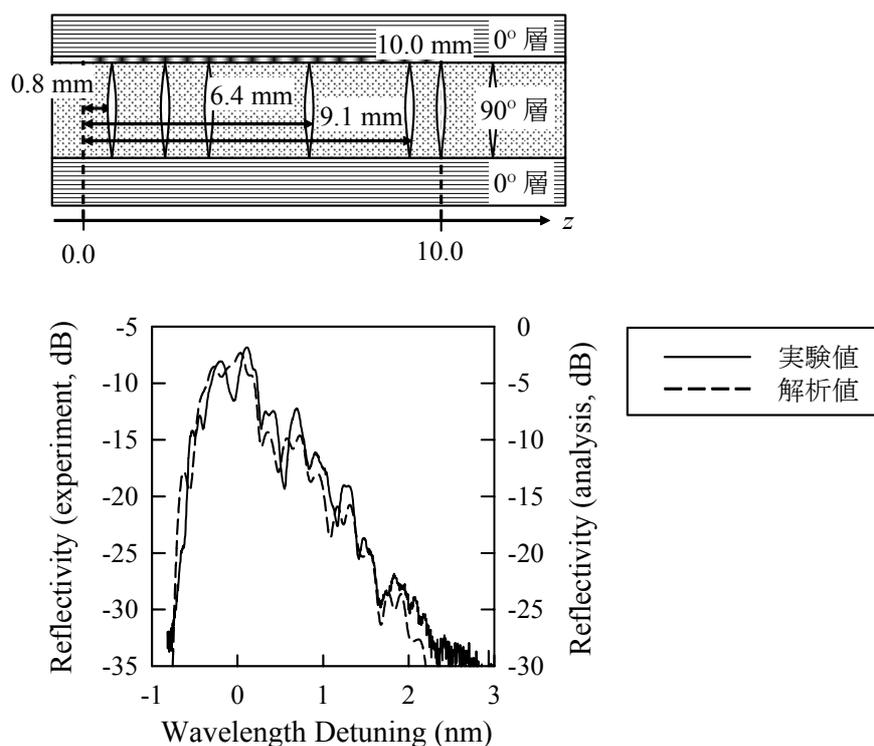


図 2 積層板内に埋め込まれた FBG によるトランスバースクラック発生を検知

の分布から損傷位置を同定する手法を提案した。そして、実測した複素反射光スペクトルに対して逆散乱法を適用し、モード結合定数を再構築し、積層板中のトランスバースクラック発生位置の同定を試みた。まずは、積層板に埋め込んでいないアポダイズド FBG に対して逆散乱法を適用した結果、アポダイゼーション形状を再現することができた。しかしながら、積層板に埋め込んだ細径 FBG では複屈折による影響から、逆散乱法による損傷位置同定が困難であることがわかった。そこで複屈折の影響を考慮しない複素反射光スペクトルを数値計算によって求め、逆散乱法を適用した。その結果、

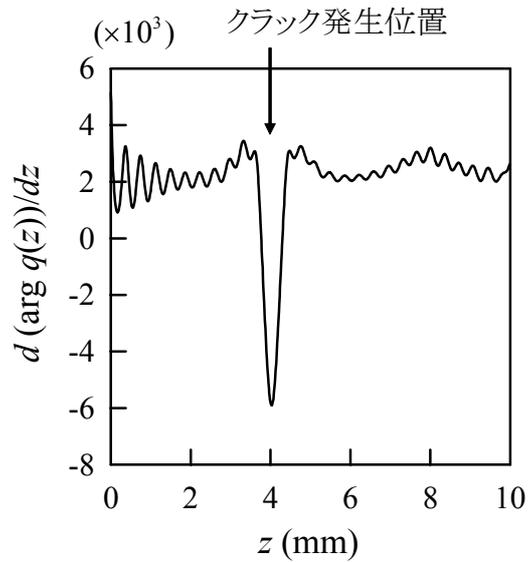


図 3 逆散乱法によるクラック位置同定結果

図 3 に示すようにトランスバースクラック位置の同定が可能であることを示した。

最後に、本研究の目的である「埋め込み FBG の不均一ひずみ分布に対する応答を利用した損傷検出技術の確立」を実構造物へ適用するための予備的な検討を行った。本研究では、再使用ロケット実験機に搭載された複合材料製の液体水素タンクに、FBG センサによる搭載型ひずみ計測システムを構築し、離着陸実験中の運用を行った。また、この技術を発展させて、埋め込み FBG センサによる複合材液体水素タンクのヘルスマニタリングシステム構築を試み、極低温加圧試験におけるひずみ・温度計測に成功した。

以上、本研究では細径 FBG の不均一ひずみ分布に対する応答を利用した複合材料積層板中の損傷検知手法およびその応用に関して多角的な研究を行い、埋め込み細径 FBG による損傷検知センサが構造健全性を保証する手段として非常に有望であることを示した。