

タイトル： 光ファイバセンサを用いたヘルスマニタリング技術の研究開発  
サブタイトル： 光ファイバセンサによる複合材料中の微視的損傷の検出

東京大学 武田展雄、岡部洋二

## はじめに

軽量複合材料システムは、軽量化、省エネルギー化を目指す分野の構造材料として多くの適用が進められてきた。しかし、さらに過酷な環境下での使用が要求される際、その軽量複合材料システムの安全性と信頼性の確保や、点検コストの低減のため、構造健全性や耐久性を評価・保証する方法の確立が重要となってくる。そのための技術革新の一つがヘルスマニタリング技術であり、これは、構造材料中にセンサを埋め込むことにより、構造物に加わったひずみや温度変化、材料中に発生した損傷等をリアルタイムで自己検知する技術である。

ヘルスマニタリングシステムへの適用が試みられているセンサのうち、最も有力で実用性の高いものの一つが光ファイバセンサである。その主な理由は、光ファイバが繊維状で柔軟性を有し、耐熱性も高いため、繊維強化複合材料中への埋め込みが容易だからである。しかも、軽量で十分な強度を有し、耐食性も強いため、複合材料の力学的特性に及ぼす影響も小さく、また、電磁誘導の影響を受けにくいいためノイズに強い。そこで筆者らは、光ファイバセンサによる複合材料中の微視的損傷の検出に関して、様々な研究開発を行っている。その中の一つが、以下に述べる、FBG( Fiber Bragg Grating )センサによる CFRP( Carbon Fiber Reinforced Plastic ) 複合材料中のトランスバースクラックの検出である。

## 1. FBG センサによる CFRP 積層板中のトランスバースクラック検出<sup>(1)</sup>

### 1.1 FBG センサ

FBG ( Fiber Bragg Grating ) とは、光ファイバのコア中の屈折率を軸方向に周期的に変化させて形成したブラッグ格子のことである。図 1 に示すように、この FBG センサに広帯域の光が入射すると、ブラッグ格子に対応したブラッグ波長 $\lambda_B$ での狭帯域の光のみが反射して戻り、それ以外の成分は透過していく。そのため、FBG センサにひずみや温度変化が生じると、ブラッグ格子のグレーティング周期や屈折率が変化し、ブラッグ波長もシフトする。よって、反射光の波長シフトからひずみや温度の変化を検出できる<sup>(2)</sup>。

通常、FBG センサによるひずみ測定は、基本的には FBG センサ部に均一なひずみが掛かると仮定して行われている。しかしながら、FBG 自体はグレーティング周期が極めて短いため、不均一なひずみ分布にも敏感である。図 2 に示すように、FBG センサに均一なひずみが加わると、反射光のスペクトルは細長い形状を保持したままシフトするが、不均一なひずみが加わった場合は様々な波長成分が戻ってくるため、スペクトル形状が崩れる。そこで、この不均一なひずみ分布への応答性を利用して、複合材料中の損傷検出を試みた。

本研究で使用した FBG センサは、一般の通信用シングルモード光ファイバ( コア径  $10\mu\text{m}$ 、クラッド径  $125\mu\text{m}$  ) 中に FBG が書き込まれたもので、グレーティング部の長さは  $10\text{mm}$ 、グレーティング周期は約  $530\text{nm}$  である。また、この光ファイバは保護のために UV 硬化樹脂の被覆( 外径  $250\mu\text{m}$  ) で覆われているが、ひずみ分布に対する応答を敏感にするため、埋め込まれる部分の被覆は除去した。

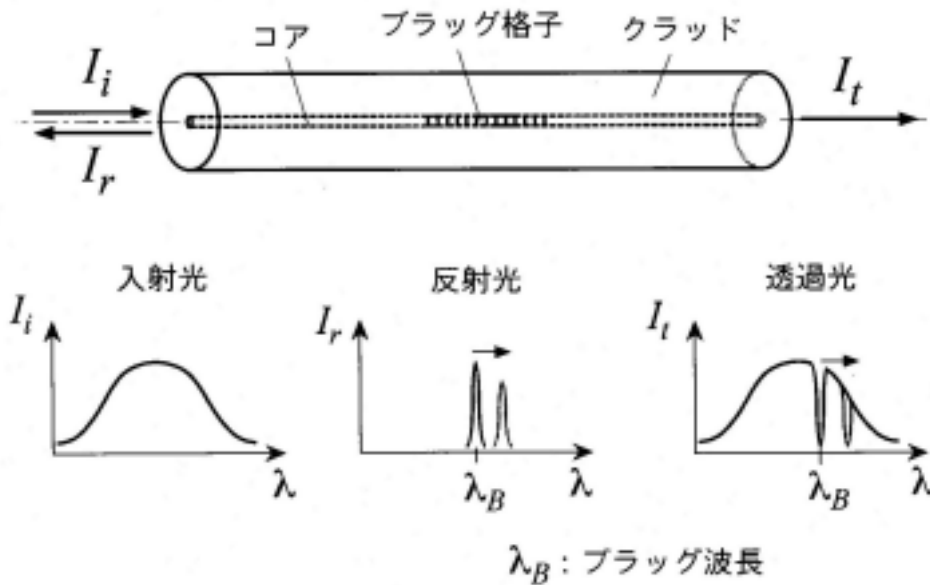


図1 FBG センサの構成と原理

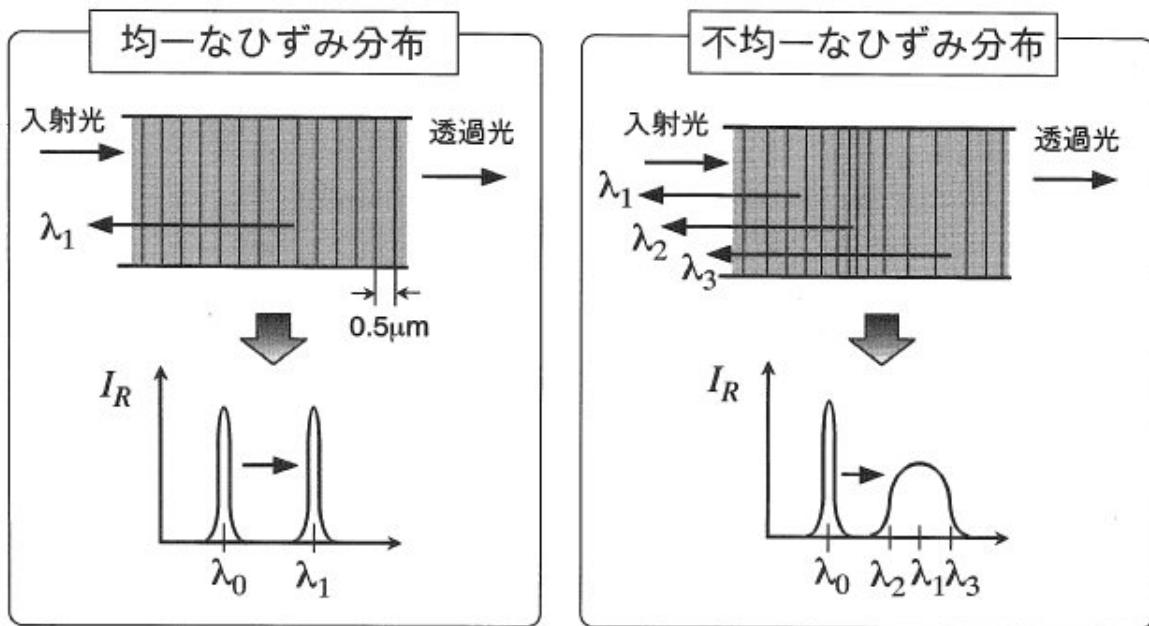


図2 FBG センサのひずみ分布への応答

## 1.2 CFRP 複合材料

CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) 複合材料とは、直径約  $10\mu\text{m}$  の炭素繊維を樹脂で固めた材料で、軽量でありながら強度と剛性が高いため、航空宇宙分野等の幅広い領域で使用されている。ただし、繊維で強化した方向に強い異方性を有するため、通常は繊維方向を変化させた単層板 (厚さ約  $125\mu\text{m}$ ) を各方向に重ねて積層板が作られる。そのため、CFRP 積層板の破壊過程は特有の微視的損傷を伴う。例えば繊維方向を直交させて重ねた直交積層板では図 3 に示すように、始めに  $90^\circ$  層中に、横方向に貫通するトランスバースクラックが発生し、その後、 $0^\circ$  層と  $90^\circ$  層との界面での層間剥離に進展する<sup>(3)</sup>。特に、トランスバースクラックは積層板の最終破断強度よりもかなり低い応力で発生し始めるので、CFRP 積層板を効率良く、しかも高い信頼性を持たせて使用するためには、トランスバースクラックの発生をリアルタイムで検出することが重要となる。そこで、トランスバースクラックの発生に伴うひずみのばらつきを利用して、それらクラックを FBG センサによって検出することを試みた。

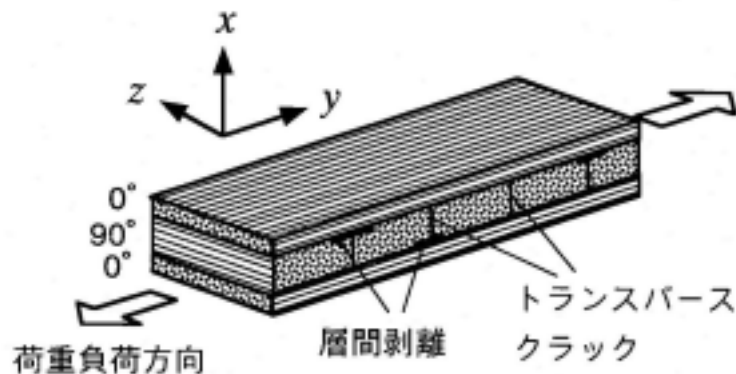


図 3 CFRP 直交積層板の破壊過程

## 1.3 実験方法

FBG センサは、図 4 に示すように CFRP 直交積層板 ( $[0_2/90_4/0_2]$ ) の  $90^\circ$  層に隣接する  $0^\circ$  層中に埋め込んだ。そのため、FBG センサは  $90^\circ$  層中に発生するトランスバースクラックに敏感であり、しかも炭素繊維に平行に埋め込まれているため破断しにくい。その試験片の形状とサイズを図 5 に、実験装置の概略図を図 6 に示す。試験片を  $0.5\text{mm}/\text{min}$  の速度で引っ張りながら、試験片表面に貼り付けた電気抵抗式ひずみゲージでひずみを測定し、ロードセルで引張荷重を測定した。光ファイバに入射させる光源には広帯域の EELED (Hewlett-Packard Company, HP83437A) を使用し、反射光のスペクトルは、様々な引張ひずみで引張試験機を停止させ、光スペクトラムアナライザ (安藤電気 (株)、AQ-6315A) で測定した。また、同時に試験片の端面のレプリカを酢酸セルロースフィルムにとっておくことで、試験終了後にトランスバースクラックの発生位置と数を調べた。

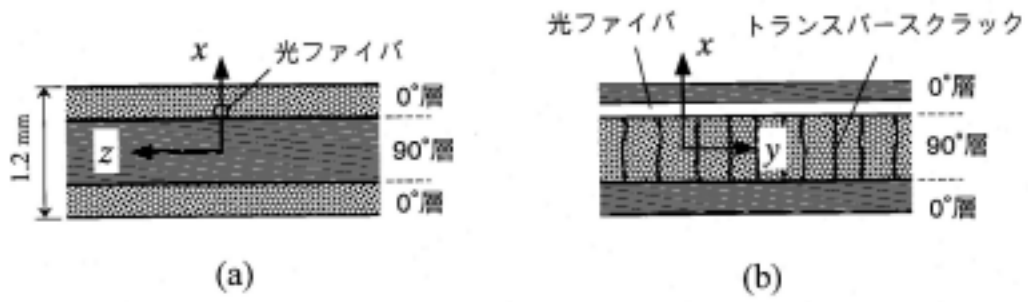


図4 FBG センサ埋込 CFRP 試験片の断面図：(a) 負荷方向に垂直、(b) 負荷方向に平行

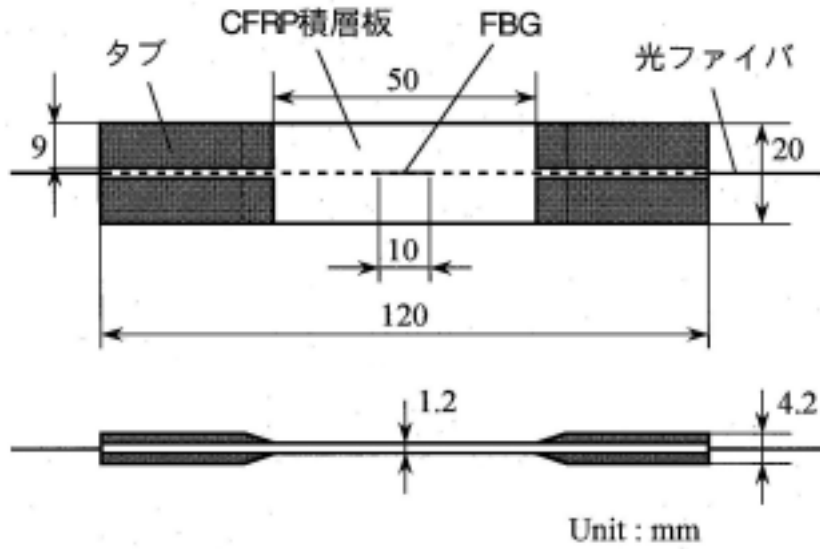


図5 試験片の形状とサイズ

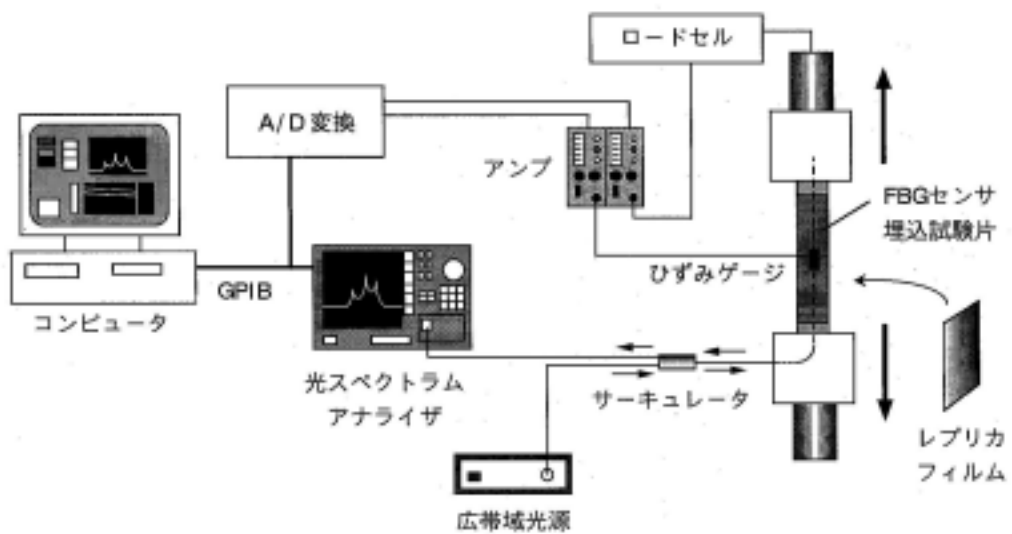


図6 実験装置の概略図

### 1.4 実験結果

図7に、光ファイバ埋込 CFRP 試験片に対して測定した引張応力 $\sigma$ とクラック密度 $\rho$ を、ひずみゲージで測定した引張ひずみ $\varepsilon$ に対して表す。ここで、クラック密度 $\rho$ は、 $90^\circ$ 層における負荷方向 1cm 当たりのトランスバースクラックの数で定義している。また図7には、反射光スペクトルの最大ピークのシフト量から計算したひずみ $\varepsilon_f$ による応力-ひずみ関係もプロットしてある。

さらに、図7のデータ(A)~(F)における反射光スペクトルを図8に示す。このグラフから、クラック密度の増加につれ、最大ピーク値が低下し、複数のピークが現れ、スペクトル幅が広くなるといった反射光スペクトル形状の崩れが確認される。その後クラック密度が飽和に近づくと、スペクトルが再び細くなり、最大ピーク値が回復していることがわかる。

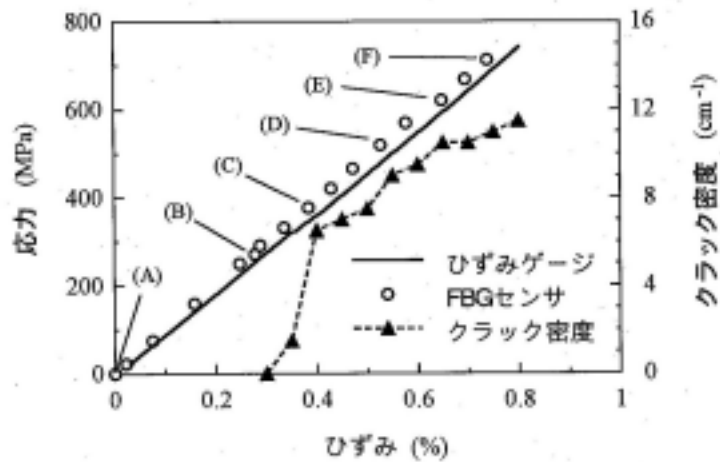


図7 ひずみゲージによるひずみ $\varepsilon$ またはFBGによるひずみ $\varepsilon_f$ に対する応力 $\sigma$ とクラック密度 $\rho$

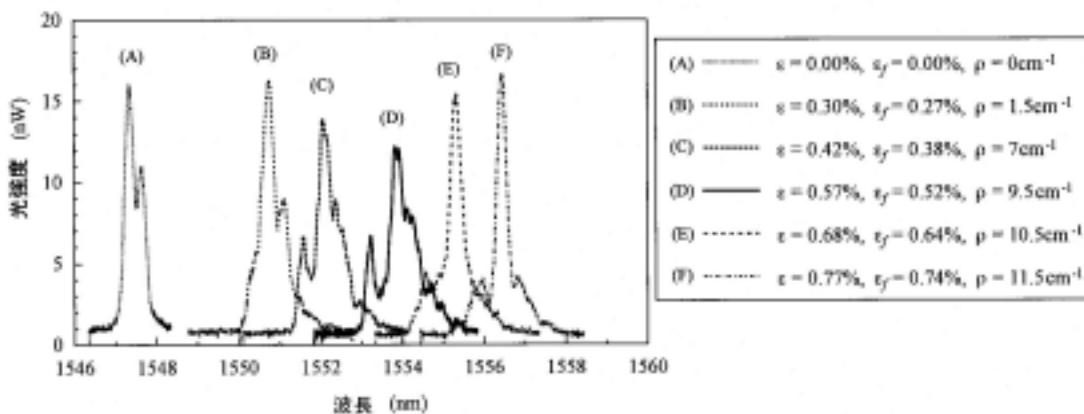


図8 図7のデータ(A)~(F)における反射光スペクトル

## 1.5 理論解析

前述のようなスペクトル形状の変化がトランスバースクラックの発生によって起きていることを確認するため、理論的なスペクトルのシミュレーションを試みた。その手順としては、始めに、トランスバースクラックを有する直交積層板の $0^\circ$ 層中の負荷方向ひずみ分布を理論的に計算する<sup>(4)</sup>。次に、そのひずみ分布とFBGの軸方向ひずみ分布が一致するとして、そのひずみ分布からFBGのグレーティング周期と平均屈折率の分布を計算する。その後、それらの分布から、Optiwave社の光導波路グレーティング解析プログラムIFO\_Gratingsを用い、モード結合理論と伝達行列法に基づいて反射光スペクトルを計算する。図7のデータ(A)~(F)に対応するスペクトルをシミュレートした結果が図9である。図8の測定結果と比較すると、トランスバースクラックの発生に伴うスペクトル形状の変化が良く似ていることがわかる。クラック密度の増加に伴いひずみ分布が不均一になり、スペクトル形状が乱れるが、その後クラック密度が飽和に近づくと、ひずみのばらつきが小さくなるため再びスペクトル形状が細長くなっている。これらの結果から、スペクトル形状の変化をモニタリングすることでトランスバースクラックの発生を検知できることがわかる。

さらに、スペクトル幅とクラック密度の関係を図10に示す。ここで、スペクトル幅は半値全幅(FWHM: Full Width at Half Maximum)で定義する。実験結果では、クラック密度が $7\text{cm}^{-1}$ の付近から急激にスペクトル幅が大きくなっているが、計算結果ではクラック発生初期からスペクトル幅が増加していることがわかる。これは図8からもわかるように、実験では熱残留応力の影響で埋め込み直後にすでに2ピーク現れ、スペクトル幅が広がっているためである。しかし、計算結果を考慮すると、FBGセンサをうまく埋め込むことができれば、スペクトル幅の測定によってクラック密度の定量的な評価が可能であることがわかる。

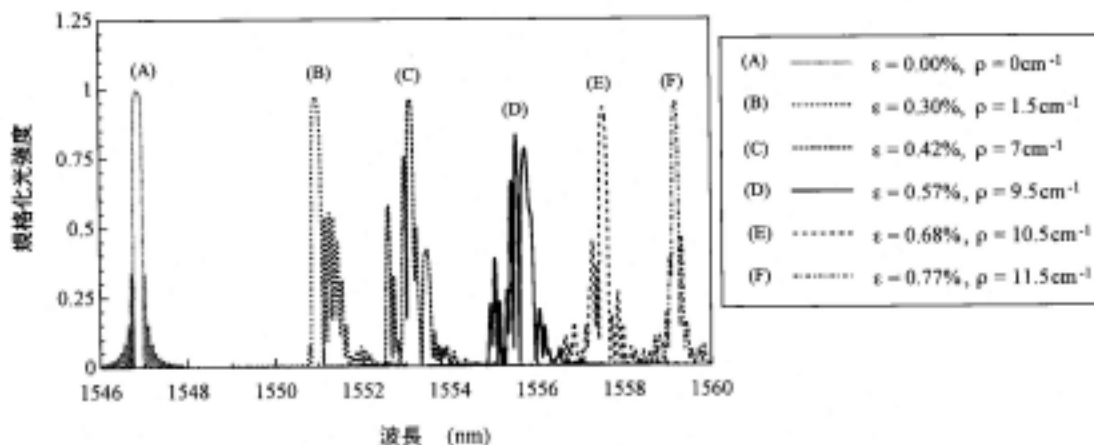


図9 反射光スペクトルの理論計算結果

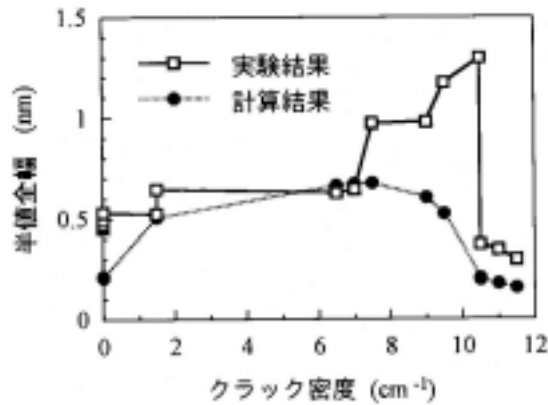


図 10 スペクトル幅とクラック密度の関係

## 2. 細径光ファイバセンサの開発

以上のように、光ファイバセンサを用いると複合材料内部の状態を精度良く知ることができるが、その際に注意しなければならないことは、光ファイバを複合材料中に埋め込むことで、複合材料自身の構造材料としての特性に悪影響を与えてはならないということである。図 11 に、通常の光ファイバを被覆除去後に埋め込んだ CFRP 積層板の断面写真を示す。光ファイバは炭素繊維に比べると極めて太く、埋め込みによって積層板の力学的特性に何らかの影響が及ぼされると考えられる。そこで筆者らは埋め込みによる影響を低減させるため、日立電線株式会社と共同で、ガラス径が 40 $\mu\text{m}$  (クラッド径: 40 $\mu\text{m}$ 、コア径: 8.5 $\mu\text{m}$ )、ポリイミド被覆の外径が 52 $\mu\text{m}$  の耐熱性細径光ファイバを作製し、さらにその細径光ファイバ中に FBG を形成した細径 FBG センサを開発した<sup>(5)</sup>。この細径光ファイバを CFRP 積層板中に埋め込んだ断面写真を図 12 に示す。被覆に沿ってきれいに炭素繊維が回り込んでおり、外径も小さいため、従来の光ファイバに比べると埋め込みによる積層板への悪影響を大きく低減させることができる。また、この細径光ファイバは通常のものと同等の力学的特性を有し、その FBG センサは十分なセンシング能力を持っているため、ヘルスマモニタリング技術の構築に大きく寄与すると考えられる。

また、川崎重工業株式会社においては、その細径光ファイバのうち、コア径が 20 $\mu\text{m}$  のマルチモード細径光ファイバを CFRP 積層板中に埋め込み、衝撃を与えた場合の光強度変化を測定している<sup>(6)</sup>。積層構成は[+45/0/-45/90]<sub>4S</sub>の疑似等方性であり、光ファイバは衝撃負荷面近くの 1、2 層間と、衝撃損傷が高密度に発生すると予想される 20、21 層間の 0°強化繊維方向に埋め込んでいる。その測定結果を図 13 に示す。光強度の変化は衝撃荷重の挙動と良く対応しており、衝撃変形やそれに伴う内部損傷の影響で光ファイバの曲げ損失が発生したため光強度が減少したと推察される。このように、埋め込んだ光ファイバの透過光強度を測定することによって、衝撃などの動的挙動を検出できることがわかる。

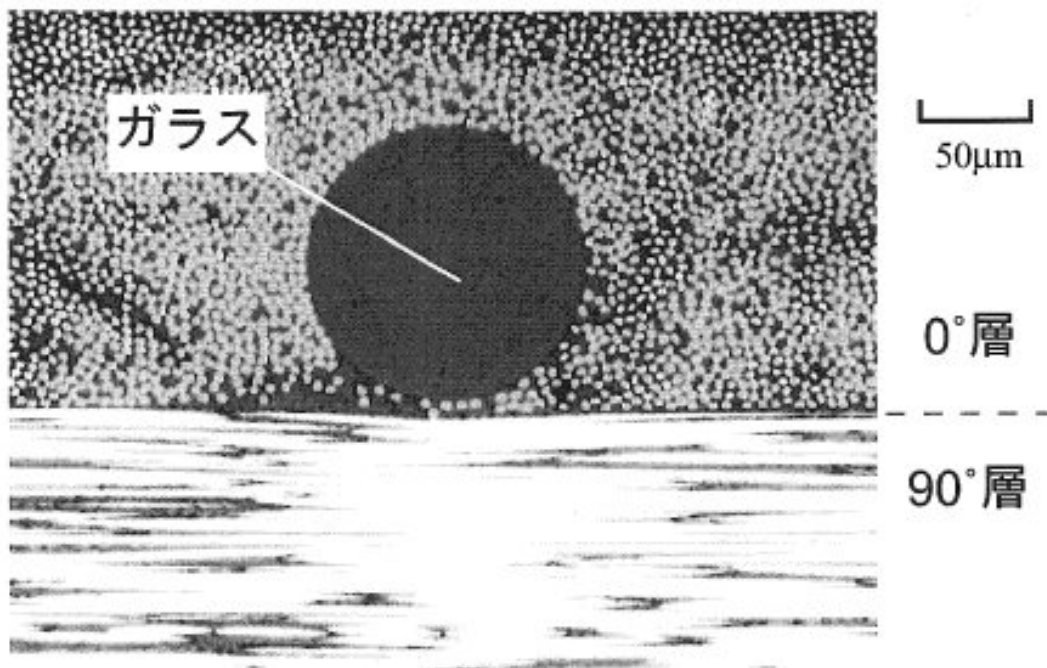


図 11 通常の光ファイバを被覆除去後に埋め込んだ CFRP 積層板の断面写真

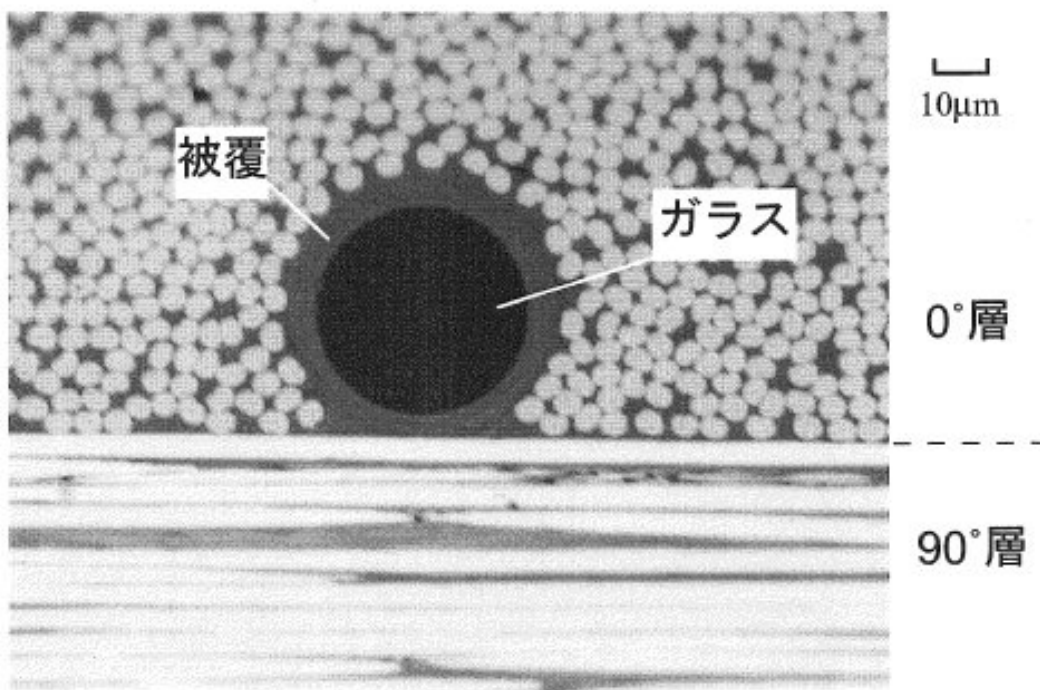


図 12 細径光ファイバを埋め込んだ CFRP 積層板の断面写真



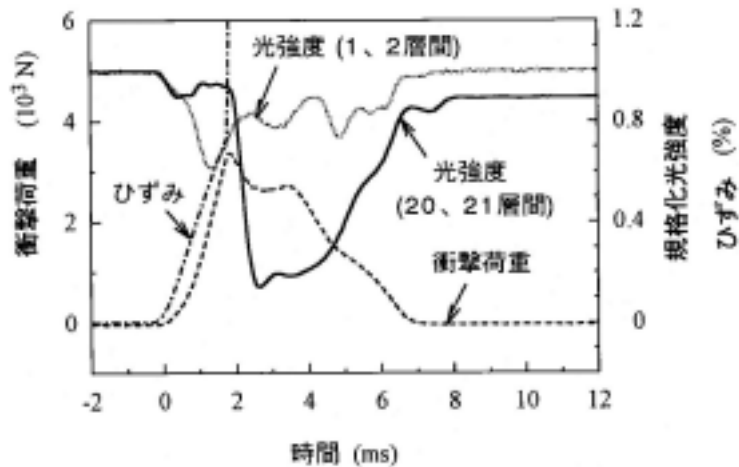


図 13 光ファイバ埋込 CFRP 積層板への衝撃負荷時の光強度変化

## おわりに

本稿では、FBG センサによって複合材料中の微視的損傷を検出する手法について説明した。また、埋め込みによる材料特性への悪影響を低減するために新規開発中の細径光ファイバセンサと、その細径光ファイバの衝撃損傷検出への応用例も紹介した。これらを始めとして様々な光ファイバセンサ技術を組み合わせるにより、より信頼性の高い、複合材料構造のヘルスマニタリングシステムの構築が可能になるであろう。なお、本稿の内容は通産省工業技術院大学連携型産業技術研究開発制度の「知的材料・構造システムの研究開発」プロジェクトの成果に基づいている。

## 参考文献

- (1) Y. Okabe, et al., Proc. 9<sup>th</sup> US-Japan Conf. Composite Materials, p.175 (2000)
- (2) A. D. Kersey, et al., J. Lightwave Technol., 15, p.1442-1463 (1997)
- (3) N. Takeda and S. Ogihara, Compos. Sci. Technol., 52, p.183 (1994)
- (4) L. N. McCartney, J. Mech. Phys. Solids, 40, p.27-68 (1992)
- (5) 佐鳥耕自 他 3 名, 第 1 回「知的材料・構造システム」シンポジウム講演集, RIMCOF, p.91 (1999)
- (6) H. Tsutsui, et al., Proc. SPIE, 3986 (in Printing) (2000)