

レーザーを用いた FBG センサー製作技術の開発

高野 智也¹⁾・中村 豪志²⁾・横谷 篤至³⁾

Development of FBG Sensors Fabrication Technique by Laser

Tomoya TAKANO¹⁾, Takeshi NAKAMURA²⁾, Atsushi YOKOTANI³⁾

Abstract

In recent years, high-performance strain sensors have been demanded in civil and architecture engineering technology. Fiber Bragg Grating sensors (FBG sensors) are attracted for such a purpose. Merits of FBG sensors are low loss, high accuracy, resistant to electrical noise. Conventional FBG fabrication process takes much time to fabricate and is generally expensive, because shucking of coated the polymer jacket, irradiation of deep-ultraviolet laser, and re-coating. So, we tried to produce FBG by irradiating the near-ultraviolet laser through the polymer jacket. We have found optimum fabrication condition. But in this technique, high Ge doped fibers are necessary. So, the next thought reducing of the hand working process successfully achieved, if we were able to remove polymer jacket partially. So, we tried to remove the polymer jacket of required portion from the fiber by femtosecond laser which is suitable for laser microfabrication. We have successfully achieved the removed until the clad of silica glass fiber was appeared.

Through this research, we could obtain basic data to produce FBG on the commercial basis.

Key Words:

Fiber Bragg Grating sensors, Polymer jacket, Near-ultraviolet laser, Ge doped fibers, Femtosecond laser

1. はじめに

近年、地球温暖化の影響などによって、観測事例に無い豪雨や災害による、ダムや堤防などの決壊により、人命や財産が奪われる事態が多発している。そこで、崩壊前や老朽化で生じる微小な歪みの検知および、崩壊の危険性の予知を行うことで、人命や財産の損失を未然に防ぐ技術が求められている。また、地震が多発する我が国においては、高層ビルな

どの建物の老朽化はもとより耐震偽装による脆弱な構造物は、崩壊の危険性があり、耐震性を何らかの方法で保障する必要がある。以上のことから、ダム、堤防、高層ビルなどの大規模建造物の歪・変形を計測するシステムが求められており、現在、盛んにその研究・開発が行われている。

そのシステムに用いる有望な歪検知素子として、光ファイバーセンサー (FBG センサー) が注目されている。このセンサーは、光ファイバー自身が元来持っている低損失、細い、軽いなどの特性を受け継いでおり、かつ高精度、電氣的ノイズに強いなどの特性を合わせ持っている。図1にFBGセンサーの

1) 電気電子工学専攻大学院生

2) 電気電子工学科学部生

3) 電気電子工学科教授

構造を示す。

FBG センサーは紫外光誘起屈折率変化を用いて、コア内にブラッグ回折格子を形成したもので、特定波長 $\lambda_B (=2n\Lambda)$ (n : 光ファイバーの実効屈折率, Λ : 屈折率変動の1周期の長さ) の光のみを反射させることのできるデバイスである。観測装置と接続することで、この波長 λ_B の変化(歪み)を検出でき、未然に災害の予知することが可能となる。

従来の深紫外光照射での FBG 作製は被覆を剥く、リコートする等の工程が必要となるため、作製時間およびコストがかかる。そこで、被覆を透過しやすい近紫外光レーザー($\lambda=335$ nm)を用いて、効率的に FBG を量産化するための作製技術が開発された。しかし、そのためには Ge30 mol%ドープのような高価な高 Ge ドープ光ファイバーが必要であり、必ずしも低コストな技術とはいえない。そこで我々はこの技術を発展させ、低コストな FBG 作製技術とするために2つのアプローチで研究を行った。1つ目は Ge30 mol%ドープ光ファイバーより低コストな Ge9 mol%ドープ光ファイバーの使用である。

2つ目のアプローチとして、我々は極めて低コストな通信用光ファイバーを用い、FBG 作製に必要最低限部分の被覆除去を目的とした、被覆加工技術の開発を行った。微細加工が可能なフェムト秒レーザーを光源として用いた。

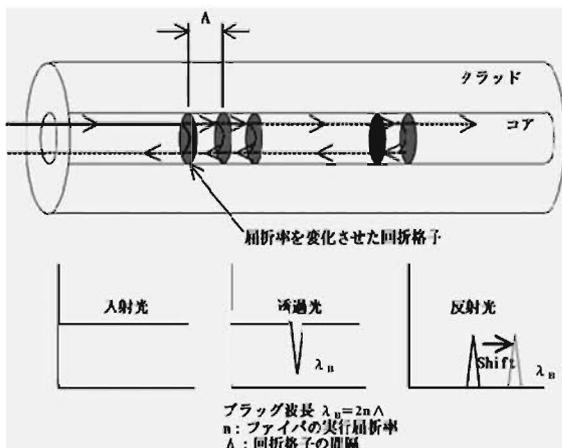


図1 FBG センサーの構造

2. 被覆を剥がさずに行う FBG 作製

図2にFBG作製実験装置図を示す。実験装置は光源として波長335nmの近紫外光レーザー、射出されたレーザーのビーム調整用のレンズやミラー、フィルタ等の光学素子、グレーティングを形成するため

の位相マスク、光ファイバーを固定しているステージ等から構成されている。

集光させた光を位相マスクを通して2つのビームに分け、ミラーボックスを経由して干渉を起こさせたビームを光ファイバーに照射した。ASE光源から光ファイバーの中に光を入れ、FBGで反射した光をサーキュレーターで分岐し、その反射光を光スペクトラムアナライザによって検出することでリアルタイムに測定を行った。FBG作製における実験条件を表1に示す。本研究で用いた duty 比というのは、1回あたりのレーザー照射時間と休止時間との比のことを指し、メカニカルシャッターを用いて調節を行った。以下に行った実験について説明する。

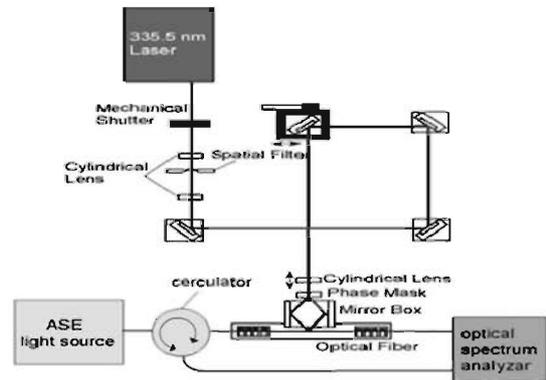


図2 FBG 作製実験装置図

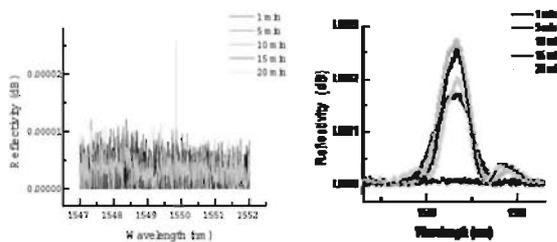
2.1 水素ロードの影響

Ge9 mol%ドープ光ファイバーは Ge30 mol%ドープ光ファイバーと比較すると、安価で通信用光ファイバーとの接続損失が低いといった強みを持っているが、ドープされている Ge 濃度が低いため吸光性の基となる欠陥が少ない。水素を高圧でかけることで光ファイバーに水素がしみ込み、欠陥を安定化させ屈折率の変化特性が高まるという性質を持つ。そこで Ge9 mol%ドープ光ファイバーに表1に示した条件で水素ロードを施し、FBG 書き込みが行えるか実験を行った。

表1 FBG 作製実験条件

	水素ロードの影響	FBG 長尺化
光源	近紫外光レーザー ($\lambda=335$ nm)	
power	210 W/cm ²	210 W/cm ²
duty 比	1:40 (10 ms:400 ms)	1:10 (3.5 ms:35 ms)
水素ロード	100 気圧、10 日間程度	

図3にFBG作製確認実験結果を示す。図3(a)は水素ロードなし、図3(b)は水素ロードを施した場合の結果である。図3(a)水素ロードなしの実験結果では20分間照射し続けても、反射スペクトルが出ず、FBGの書き込みが出来なかった。図3(b)の実験結果では、照射時間とともに増加していく。反射スペクトルのピークを確認することができた。このことよりGe9 mol%ドープ光ファイバーにFBG作製可能であることが分かった。Ge9 mol%ドープ光ファイバーでFBG作製できたのは、水素ロードを施したことで光ファイバーの吸光性が高まり、FBG書き込みしやすくなったものと考えられる。



(a) 水素ロードなし (b) 水素ロードあり

図3 水素ロードの影響

2.2 FBG長尺化

Ge9 mol%ドープ光ファイバーにFBG書き込み可能であることを確認できたが、反射率が低いので、FBG書き込みを長くすることで反射率の向上を目指した。そこでGe9 mol%ドープ光ファイバーにおけるFBG作製最適照射条件を割り出し、FBG長尺化を行った。

FBG長尺化の実験結果を図4に示す。図4は書き込み長に対するFBGの反射率を示している。最適照射条件を用いFBG長尺化することで、反射率を約0.1 dBまで増加させることができた。しかしながら、センサーとして用いるためには反射率 0.25 ± 0.05 dBが必要とされており、本実験で仕様値を満たすことができなかった。今回約47 mmで約0.1 dB到達することができたので、書き込み長さを2倍の94 mmまで伸ばすことで反射率が仕様値を満足する0.20 dBまで到達できると考えられる。また日進月歩な計測器の進歩により、最新の感度の別の高い計測法と組み合わせることで本研究開始初期に要求された光スペクトラムアナライザの使用を想定にきめられたこの仕様値も今後変化していく可能性も大きい。より反射率の小さいFBGでも使用可能になるのではないかと考えられる。

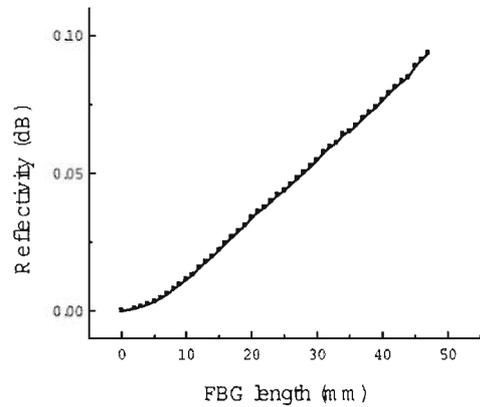


図4 FBG書き込み長に対する反射率

3. レーザーによる被覆の部分加工

被覆加工実験における加工部構成を図5に示す。本実験では使用する光源をフェムト秒レーザーとした。メカニカルシャッターを用いてショット数制御を行い、虹彩絞りでビーム光の大きさを調整し、平凸レンズ($f=100$ mm)で集光させて、サンプルの光ファイバーに照射させた。光ファイバーはX軸(光ファイバー長手方向)、Y軸(レーザー伝搬方向に平行)、Z軸(サンプル上下方向)へ動かせるようにステージを設置した。

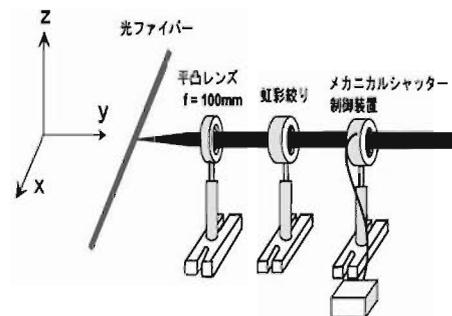


図5 加工部概略図

3.1 被覆加工実験

光ファイバーの被覆加工方法は図6のように、①光ファイバーの被覆上端当たり始めから少しずつ位置を下げて加工、②目的の位置まで到達したら光ファイバー長手方向に $30 \mu\text{m}$ ずつ計 $300 \mu\text{m}$ 平行移動、③光ファイバー被覆上端へ向けて照射位置上昇、を行った。この方法で、光ファイバーの被覆加工を行った。被覆加工における実験条件を表2に示す。

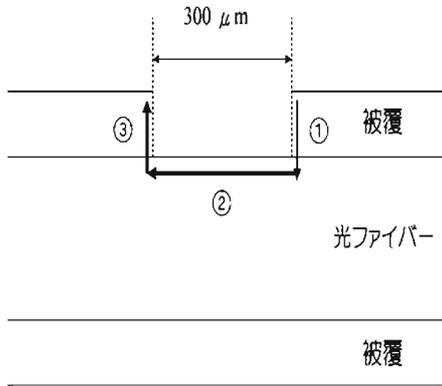


図6 被覆加工方法

表2 被覆加工実験条件

光源	フェムト秒レーザー ($\lambda=800\text{ nm}$)
繰り返し周波数	10 Hz
Shot 数	被覆を貫通するまで
出力	0.2 ~ 0.5 mJ/pulse

上記①の移動距離を $60\ \mu\text{m}$ とした時の結果を図7に示す。図7はサンプルZ軸方向から観察したものである。光ファイバーは、コア、クラッド、被覆で構成されており、被覆は第1被覆および第2被覆の2層であり、クラッド部が見えた。同様の実験を行い再現性をとった結果、被覆上端から $60\sim 70\ \mu\text{m}$ 下げることによって安定にこのような状態で加工できることが確認できた。そのため、ファイバー被覆上端からの加工位置が $60\sim 70\ \mu\text{m}$ で加工すれば理想的な加工ができるのではないかと考えられる。

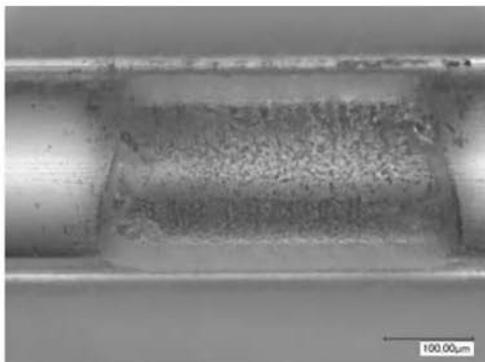


図7 真上方向からの被覆除去加工実験結果

3.2 引っ張り強度試験

将来、FBG 作製するにあたって、加工後に光ファイバーの強度がどう変化するか確認する必要がある。そこで被覆未加工のファイバーおよび被覆加工後のファイバーに対し、引っ張り強度試験を行った。引っ張り強度試験において、図8のような引っ張り強度測定機にサンプルファイバーをセットし、強度を測定した。いずれのファイバーも長さを $100\ \text{mm}$ に統一して測定を行った。

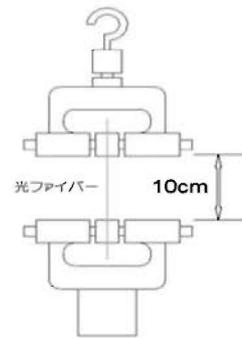


図8 引っ張り強度測定機及びファイバー設置条件

図9に光ファイバーの引っ張り強度試験の結果を示す。全長 $100\ \text{mm}$ のファイバーを用い、横軸はファイバーの伸び (mm)、縦軸はファイバーにかかる荷重(N) を表している。グラフの傾きは、伸びやすさ(ばね定数)を表している。線形にグラフが伸び、グラフの線が真下に落ちることが確認できた。グラフの線が真下に落ちた箇所は、ファイバーが切断した箇所を表している。

引っ張り強度試験で得られた被覆加工後ファイバーの引裂強度は約 $5.0\ \text{N}$ 、その時のファイバーの伸び幅は $0.7\ \text{mm}$ であった。産業界からはFBGをセンサーとして用いるために、 $100\ \text{mm}$ のファイバー長に対し、 $1\ \text{mm}$ の伸びを確保してほしいという要求がある。本実験で得られた結果は、その数値に近い値であった。

図9の破断強度曲線より、傾きを計算することでファイバーの伸びやすさを出すことができる。以下に結果を示す。

- ・未加工ファイバー $6.86\ \text{N/mm}$
- ・加工ファイバー $7.16\ \text{N/mm}$

加工ファイバーでは、加工部とともに未加工部も伸びている。そこで、力学的な計算でそれぞれの伸び方の特性を見積った。

加工ファイバーは図 10(a)のようにになっているので、3 つのばねが直列に接続されているのと同様に考えることができる。そのため、加工部のみのばね定数を算出し、300 μm の加工と未加工ファイバーのばね定数と破断強度と同じ力 5N を加えた時の伸びは

加工部 171 N/mm 300 μm⇒329 μm
未加工部 2290 N/mm 300 μm⇒302.4 μm

となり、加工後のファイバーは伸びやすくなり敏感な波長応答がのぞめるといえる。

次に FBG 書き込みに必要な長さを 10 mm と仮定して図 10 (b)のように加工を行った場合、破断するまでにファイバー全体のばね定数を算出したところ

ファイバー全体 1.19 N/mm

となった。これが、1 mm 伸びるために必要な力は 1.19 N となる。この数値は、ファイバーの破断強度 5 N より十分小さく、商品化で必要とされる伸び 1 mm まで引き伸ばしても破断することはないと考えられる。

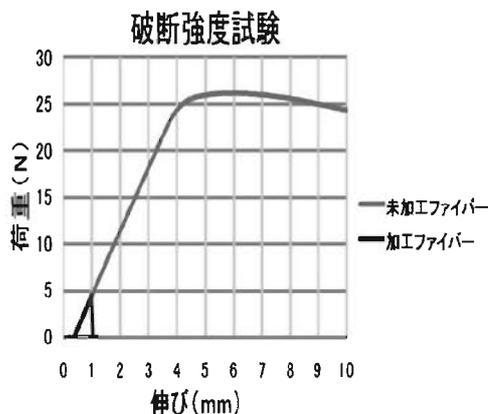


図 9 引っ張り強度試験結果

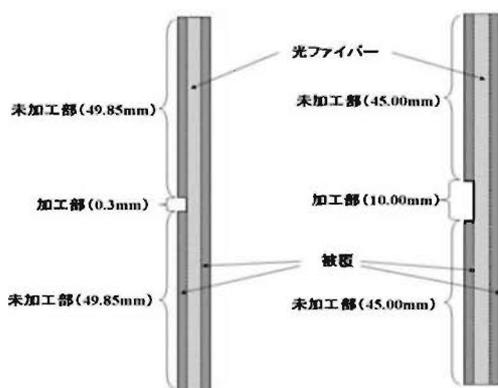


図 10 ばね定数算出のイメージ

4. まとめ

FBG 製造の低コスト化を目指し、2 つのアプローチで FBG を量産化するための技術開発を行った。その結果より以下のことが分かった。

○被覆を剥がさずに行う FBG 作製

- ・ Ge9 mol% ドープ光ファイバーに水素ロードを施すことによって、FBG 作製可能であることが分かった。
- ・ FBG 書き込み長を伸ばすことで、確実に反射率を伸ばすことができた。

○レーザーによる被覆の部分加工

- ・ フェムト秒レーザーを用いて被覆加工を行った結果、安定にクラッド部まで到達する加工ができ、FBG 製作に必要な部分のみの被覆の除去に成功した。
- ・ 引っ張り強度試験より、工業的に要求されている FBG の必要な伸び幅に近い値を得ることができた。加工部は敏感な波長変化がのぞめる。加工長さが 10mm でも耐久性は十分得られる。

両アプローチとも原理的に実現可能であることを示すことができた。今後もこのようにデータ蓄積を続けていくことで、効率の良い FBG 作製技術の開発の道が開けると考えられる。

参考文献

- 1) 川上彰二郎『光導波路』朝倉書店
- 2) 成田浩・上之菌博『光ファイバー通信・計測技術』電気書院
- 3) 黒澤宏・横田光広『ファイバー光学の基礎』オプトロニクス社
- 4) 後藤頭也・稲葉文男・永井淳『オプトエレクトロニクス入門』オーム社
- 5) 黒澤宏『レーザー基礎の基礎』オプトロニクス社
- 6) 新井武二『レーザー加工の基礎工学 理論からシミュレーションまで』丸善株式会社