

# ファイバグレーティングセンサ反射特性の シミュレーションによる解析

佐藤 明子<sup>1)</sup>・福島 康広<sup>2)</sup>・加藤 隆晴<sup>3)</sup>・亀山 晃弘<sup>4)</sup>  
甲藤 正人<sup>5)</sup>・横谷 篤至<sup>6)</sup>・黒澤 宏<sup>7)</sup>

## Analysis by the simulation of the character of reflection of the Fiber Bragg Grating sensor

Akiko SATO<sup>1)</sup>, Yasuhiro HUKUSHIMA<sup>2)</sup>, Takaharu KATO<sup>3)</sup>, Akihiro KAMEYAMA<sup>4)</sup>  
Masato KATTO<sup>5)</sup>, Atsushi YOKOTANI<sup>6)</sup>, Kou KUROSAWA<sup>7)</sup>

### Abstract

Refractive indices of silica glass are well known to change when ultra violet light is irradiated. With the photo-refractive effect, regions with different refractive indices are generated in an optical fiber. Fiber Bragg Grating (FBG) that has a periodic structure of different refractive indices shows a sharp reflection spectrum at a wavelength. The center wavelength, width, depth and sub peaks of the reflection spectrum depend on the periodicity, index difference, and index distribution of the structure. However, it is considerably difficult to measure the indices of the structure, because the size is as small as an order of optical wavelength used. I simulate the reflection spectra by changing the length and intensity distribution within the laser beam and index change. By comparing the simulated spectra with there measured, I have found that the laser beam has Gaussian-type intensity distribution and that the spectra depend on the length and index change distribution. On the basis of the simulation, you can obtain the laser parameters for fabricating a desirable FGB.

### Key Words:

The photo-refractive effect, Optical fiber, Fiber Bragg Grating (FBG), Refractive indices, Gaussian-type

- 
- 1) 電気電子工学専攻大学院
  - 2) 電気電子工学科
  - 3) 電気電子工専攻大学院
  - 4) 電気電子工学科助手
  - 5) 電気電子工学科助教授
  - 6) 電気電子工学科助教授 電気電子工学科教授

### 1. はじめに

Ge をドープした石英ガラスに紫外光を照射すると、屈折率が増大する。これをフォトリフレクティブ効果という。この現象によって、紫外光の干渉縞を光ファイバに照射すると、強い光が当たった部分での光ファ

イバ中では屈折率が增大する<sup>1)~9)</sup>。このように光ファイバ中に周期的な屈折率変化を生じさせる事により、ブラック格子を形成したものをファイバグレーティング (FBG) という<sup>10)</sup>。FBG は周期構造に応じて特定の波長 ( $\lambda = 2n_0 \Lambda$   $n_0$ : 光ファイバの実行屈折率,  $\Lambda$ : 屈折率変動の一周期の長さ) の光を反射させる特性を持っている。また、温度や歪が加わる事によって反射波長が変化するので、これを用いる事によってセンサとして構成出来る。計測技術の高度化によって、様々な用途を目指した多様なセンサの進展が著しい中、このような FBG センサは、精度が高い・多点での測定が可能等の理由から注目を集めている。実際、水素ドープを行ったシングルモード光ファイバに、位相マスクを通して KrF エキシマレーザーを照射し、FBG を作製する事で、尖鋭な反射スペクトルが得られた。この FBG をセンサとして用いる為には、その透過スペクトルの波形や半値幅が、感度や分解能を決定するので重要となる。透過スペクトルの波形や半値幅は、FBG 中の屈折率分布や変化量に関係しているが、FBG 中の屈折率は直接測定する事が不可能である為どのようになっているかは不明であった。そこで本研究では、いくつかのモデルを考え、シミュレーションによって反射曲線を計算し、実測値と比較する事によって、屈折率変化量の分布を見積もった。また、センサとして FBG を用いる為には、その透過スペクトルの透過減衰量は 10dB 以上あり、その際の半値幅は出来るだけ狭く、リップルの無いものが求められる。そこで、シミュレーションによって得られた結果より、理想的な特性を持つ FBG の作製条件を検討した。

## 2. FBG 作製実験

図 1 に FBG 作製における概念図を示す。KrF エキシマレーザー ( $\lambda = 248\text{nm}$ ) 光を、位相マスクを通す事によって干渉させ、その干渉縞をシングルモード光ファイバに照射し FBG を作製した。光ファイバには、前処理として水素ドープを施し (100 気圧、10 日以上)、光感光性を向上させた。光ファイバの両端に ASE (自然放出光) 光源と光スペクトルアナライザを接続する事によって、その透過スペクトルを常時モニタリング出来るようにした。またスリットを用いて、レーザービームを光ファイバに照射する長さ (書き込み長さ) を 5~20mm に変化させた。

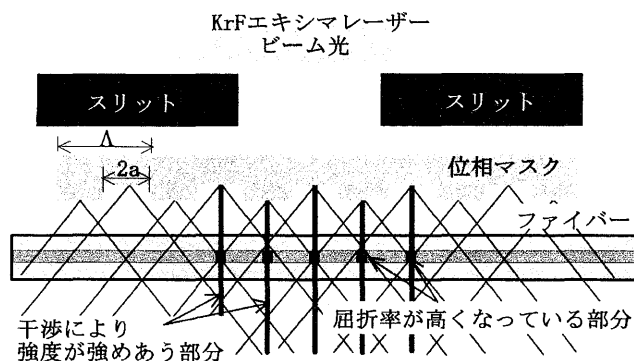


図 1 FBG 作製における概念図

## 3. シミュレーションモデル

次に、シミュレーションにより FBG の反射曲線の計算を行い、作製実験結果と比較した。比較に用いた実験結果の作製条件を表 1 に示す。まず位相マスクを通った後の光の強度分布を考えた。レーザービーム光は、位相マスクを通った後、+1 と -1 次光に分けられ、それらの干渉によって正弦波状の強度分布を持っている。また光ファイバに照射するレーザーは、光ファイバの長手方向のビーム内に、次式で示すようなガウス型の強度分布を持っていると考えられる。

$$I = I_0 \exp(-x^2/a^2) \quad (3.1)$$

$I_0$ : ビーム中心での強度

$a$ : 振幅が最大振幅の  $1/e$  に減衰する距離 (ビーム半径)

そこで、このような光によって作製される FBG 中の屈折率も、同じような分布を持っていると考えられるが、計算を簡単にする為に、以下の 3 つのモデルを考え、反射曲線を計算した。

- モデル 1: 屈折率分布はステップ型<sup>11),12)</sup>  
レーザービーム内強度分布は均一
- モデル 2: 屈折率分布は正弦波状<sup>13)</sup>  
レーザービーム内強度分布は均一
- モデル 3: 屈折率変化は正弦波状  
レーザービーム内強度分布はガウス型

これらの概念図を図 2 に示す。

表 1 FBG の作製条件

書き込み長さ	5mm	20mm
使用レーザー	KrFエキシマレーザー( $\lambda=248\text{nm}$ )	
フルエンス	$62.5\text{mJ}/\text{cm}^2$	
ショット数	7500shot	2400shot
使用ファイバ	SMF( $\text{GeO}_2:4\text{mol}\%$ ) 水素ドーブ(100気圧、10日間以上)	

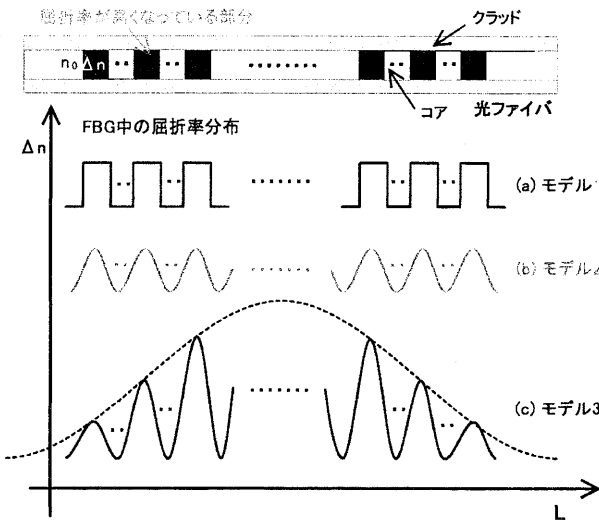


図 2 FBG 中の屈折率分布

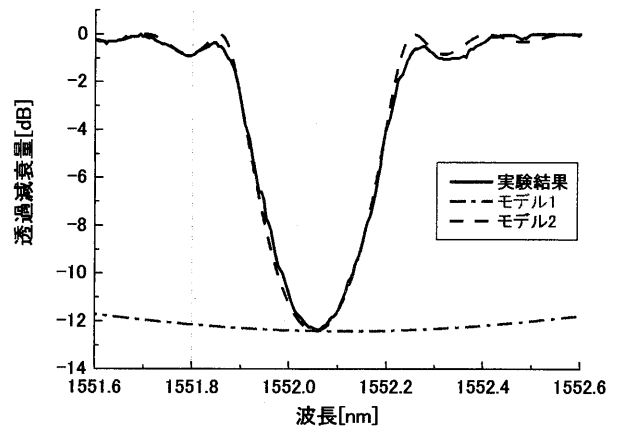


図 3 作製した FBG の透過スペクトルとモデル 1,2 によって計算した透過スペクトルとの比較

#### 4. 実験結果と考察

##### 4.1 シミュレーション結果と FBG 作製実験結果の比較

モデル 1,2 を用いて行ったシミュレーション結果と FBG 作製実験結果の比較を図 3 に示す。結果より、モデル 2 の場合が実験結果の波形と近くなった。この事より FBG 中の屈折率変化は、光ファイバに照射するレーザービームに依存して、正弦波状の分布を持っている事が分かった。ここで、比較に用いた実験結果は、書き込み長さ 5mm で作製した FBG の透過スペクトルとなる。書き込み長さが短い場合は、レーザービーム内の強度差の影響をほとんど受けないが、書き込み長さを長くするにつれて、レーザービーム内の強度分布が均一の場合と分布を持っている場合とは異なってくる。そこで、書き込み長さを長くして作製した FBG の透過スペクトルと、モデル 2 を用いた計算結果を比較した。その結果を図 4 に示す。書き込み長さ 5mm の場合は、実験結果と波形が非常に一致し

ていたのに対し、書き込み長さを長くするにつれて、半値幅は変わらないものの、裾の広がりやリップル等、実験結果の波形とは異なっていた。これはモデル 2 において、レーザービーム内強度分布を均一と仮定した為で、書き込み長さを長くするにつれて、ビーム内強度分布の影響を受けた為と考えられる。そこでレーザービーム内強度分布を考慮した。光ファイバに照射されるレーザーは、ビーム内に式(3.1)に示されるガウス分布を持っていると考えられ、その強度分布はレーザービーム半径  $a$  によって異なる。レーザービーム半径が小さい場合、ビーム内の最大強度と最小強度の差が大きくなる。これに対して、レーザービーム半径が大きい場合、その差はほとんど無くなる。そこで、レーザービーム半径が小さい場合と大きい場合を仮定した際に得られた計算結果と実験結果を比較した。その結果を図 5 に示す。レーザービーム半径が大きいと仮定した場合は、ビーム内強度分布が均一と仮定した場合と同様、裾の広がりやリップル等、実験結果の透過スペクトルとは異なった。それに対し、レーザービーム半径が小さい、つまりレーザービーム内の強度差を大きいと仮定した場合、全体の波形やリップルが出ないこと等、実験結果の透過スペクトルと近くなった。この事より、光ファイバに照射されるレーザーは光ファイバの長手方向のビーム内に、ガウス型の強度分布を持っていると言える。ここで、比較に用いた実験結果は、書き込み長さ 20mm で作製した FBG の透過スペクトルとなる。この実験結果と近い透過スペクトル

を得る為に、変化させた最大屈折率変化量は  $\Delta n=1.09 \times 10^{-4}$  であった事より、透過減衰量を 11dB 得る為に必要な最大屈折率変化量は 0.01% と推定できる。

4.2 FBG 透過スペクトルの特性

FBG をセンサとして使用する際、その透過スペクトルの半値幅や波形が、分解能や感度を決定するので重要となる。そこで、シミュレーション結果より、そ

れらがどのパラメータに影響されるかを調べた。ここで、パラメータとして、リップルの大きさやレーザービーム内強度分布を用いる為に、透過スペクトルのメインピークを  $P_c$ 、サイドに見られるリップルを  $P_1$  とおき、リップルの大きさを  $P_1/P_c$  と表した。更に、レーザービーム内の最大強度を  $I_{max}$ 、最小強度を  $I_{min}$  とおき、レーザービーム内強度差を  $I_{max}/I_{min}$  と表した。

まず初めに、透過スペクトルの半値幅に影響するパ

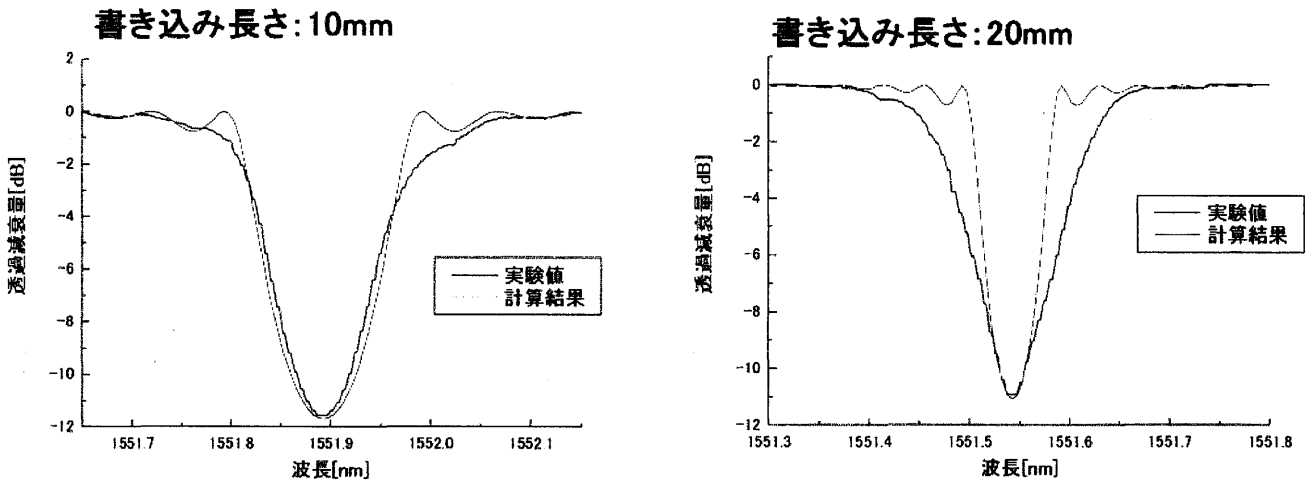


図4 作製したFBGの透過スペクトルとモデル2によって計算した透過スペクトルの比較 (書き込み長さ 10,20mm)

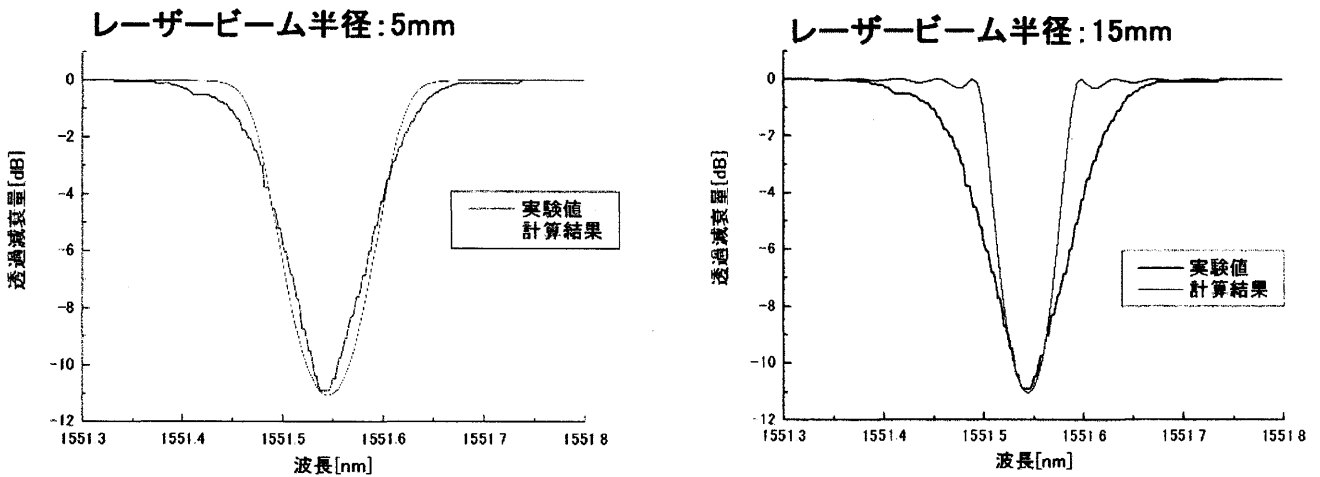


図5 作製したFBGの透過スペクトルとモデル3によって計算した透過スペクトルの比較 (書き込み長さ 20mm)

ラメータについて調べた。その結果を図 6 に示す。結果より、半値幅は書き込み長さに大きく影響され、書き込み長さが長くなるにつれて、半値幅は狭くなった。書き込み長さが長くなるという事を言い換えれば、光ファイバ中に屈折率の異なる領域が多くなる事を示す。屈折率の異なる領域が多くなると、それぞれの界面からの反射波が増加するので、全体の反射波は多光波になり、半値幅が狭くなると考えられる<sup>14)~16)</sup>。また、センサとして用いる為には、透過スペクトルの半値幅は 100pm 以下の必要がある為、グラフより書き込み長さが 10mm 以上必要であると言える。またレーザービーム内強度分布差は、半値幅にほとんど影響を与えない事が分かった。

次に、透過スペクトルのリップルの大きさに影響するパラメータについて調べた。その結果を図 7 に示す。結果より、リップルの大きさも書き込み長さに大きく影響される事が分かり、書き込み長さを長くするにつれて、リップルの大きさは小さくなった。またビーム内に強度分布がある場合、リップルの大きさは 0 に近くなり、ほとんど見られなかった。これに対して、レーザービーム内強度分布を均一とした場合、リップルは非常に大きくなった。この事より、リップルを小さくする為には、照射するレーザーのビーム内に、強度

分布をつける必要がある事が分かった。一般に、多重反射の場合必ずリップルは出るが、光ファイバに照射するレーザーのビーム内に強度分布をつける事によって、FBG 中の屈折率分布も同じように分布を持つので、多重反射条件が変化する。これにより、メインピークが他のピークを無視出来るほど大きくなる。すなわち、透過スペクトルのリップルが小さくなったのではなく、むしろ、リップルが無視できるほど、メインピークが大きくなった事を示している。

5. まとめ

FBG 中の屈折率分布や変化量を知る為には、シミュレーションによって反射曲線を計算し、実測値との比較を行った。その結果より以下の事が分かった。

- FBG 中の屈折率変化は正弦波状の分布を持っている。
- 本研究で使用した KrF エキシマレーザーは光ファイバの長手方向のビーム内にガウス型の強度分布を持っている。
- FBG の透過スペクトルの半値幅は書き込み長さに大きく影響され、書き込み長さが長くなるにつれて、半値幅は小さくなる。

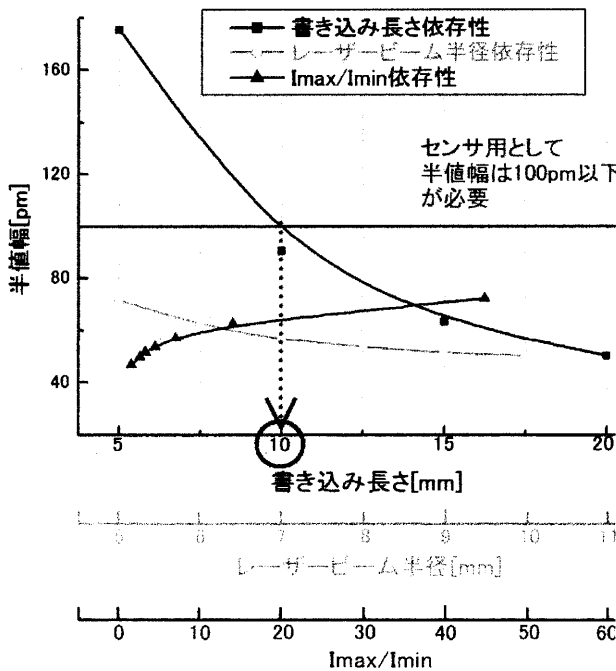


図 6 FBG の透過スペクトルの半値幅に影響するパラメータ

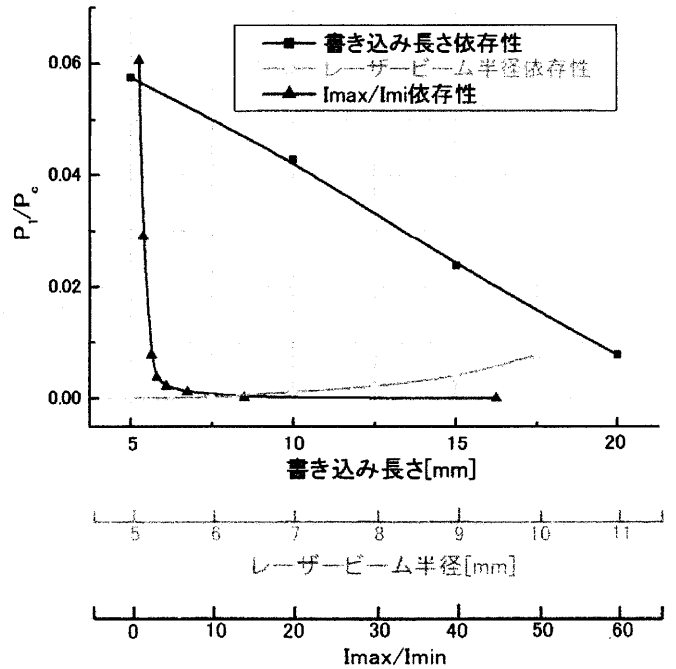


図 7 FBG の透過スペクトルのリップルに影響するパラメータ

- FBG の透過スペクトルのリップルも書き込み長さに大きく影響され、更に、光ファイバに照射するレーザーのビーム内に強度分布をつける事によって、その大きさを抑制出来る。
- FBG の透過スペクトルの半値幅・リップルの大きさは、書き込み長さ・レーザービーム内強度分布に影響される。

以上より書き込み長さやレーザービーム内強度分布などのパラメータを変化させる事によって、希望する FBG を作製出来る。

#### 参考文献

- (1) 上之菌博、成田浩：光ファイバ通信・計測技術
- (2) 西村憲一、白川英俊：やさしい光ファイバ通信
- (3) 黒澤宏、横田光広：ファイバー光学の基礎
- (4) 藤井陽一：光ファイバ利用技術
- (5) 佐々木清人：わかるセンサ技術
- (6) 井上享：ファイバグレーティング レーザー研究, 23 No.10 (1995) 68-77.
- (7) K. O. Hill, B. Malo, D. C. Johnson, and J. Albert; Bragg grating fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through phase mask *Appl. Phys. Lett.*, 62, No.10 (1993) 1035-1037.
- (8) Dong, J. L. Archambault, L. Reekie, P. St. J. Russell, and D. N. Payne: Photoinduced adsorption change in germanosilicate performs: evidence for the color-center model of photosensitivity *APPLIED OPTICS*, 34, No.18 (1995) 3436-3440.
- (9) J. Albert, B. Malo, K. O. Hill, D. C. Johnson, and S. Theriault: Comparison of one-photon and two-photon effects in the photosensitivity of germanium-doped silica optical fibers exposed to intense ArF excimer laser pulses *Appl. Phys. Lett.*, 67, No.24 (1995) 3529-3531.
- (10) 水波徹：光ファイバ回折格子 応用物理, 67, No.9 (1998) 1029-1033.
- (11) 金原繁：薄膜
- (12) 横田英嗣、池田英生、石黒浩三：光学薄膜
- (13) 井上享、岩島徹、角井素貴、茂原政一、服部保次：ファイバグレーティングとその応用 応用物理, 66, No.1 (1997) 33-36.
- (14) 桜庭一郎、高井信勝、三島瑛人：光エレクトロニクスの基礎
- (15) 左貝潤一：光学の基礎
- (16) 坂田亮：物性科学