

波長多重技術を用いた分布型光ファイバセンサの実験教育

佐野安一*1・中山英俊*2・鈴木宏*3・中島隆行*4・岸佐年*5

Education by Means of Experiments on Optical Fiber Distributed Sensing Using Wavelength Division Multiplexing Technique

SANO Yasukazu*1, NAKAYAMA Hidetoshi*2, SUZUKI Hiroshi*3,
NAKAJIMA Takayuki*4 and KISHI Satoshi*5

Research on distributed sensing based on fiber Bragg grating is changing its stage from the laboratory phase to the phase of real various kinds of industrial applications such as the application in the region of pre-maintenance for high-tech aerospace, building and constructions called as health monitoring especially very important for our country Japan occasionally having earthquakes. This phase change began in the middle of 1990s when the technique suitable for mass-production of fiber Bragg gratings was invented. This trend will become stronger in the future. From this view point, Department of Electronics and Control Engineering of Nagano National College of Technology started the education by means of experiments on distributed sensing based on optical fiber Bragg gratings. This paper describes the text.

キーワード：波長多重，光ファイバ，ブラッググレーティング，分布計測，ヘルスマニタリング

1. はじめに

光応用技術の最近の技術の発展には目覚ましいものがある。特に通信分野ではインターネットブロードバンドに象徴されるように実用化が着々と進んでおり社会に大きなインパクトを与えている。同時に更なる性能向上を目指した研究開発が世界各国で活発に進められている。財団法人光産業技術振興協会の「光産業の将来ビジョン」によれば今後の社会状況の変化を考慮した上で現在の高専生が実社会で活躍し始めると想定される 2015 年には情報通信分野の国内市場規模は 2002 年の 0.2 兆円に対して 2 兆円になると予測されている。通信分野と比べ実用化は遅れているものの計測分野における光応用技術の実用化研究も世界各国の研究機関で活発に推進されており 1 年半ごとに開催されている光ファイバセンサ国際会議は毎回何百件もの研究論文が発表されている。当科電子制御工学科の教育研究の対象である

計測，信号伝送/通信，制御に関わる光産業例えばパソコン等の入出力分野では 1.3 兆円が 2.6 兆円に，環境・センシング（計測）分野では 0.4 兆円が 1.8 兆円に増加するものと予測されている。

このような背景を踏まえて当電子制御工学科の技術者教育を考えたとき，光応用技術に関する技術教育は必須の要件と考えられる。このため当科では通信工学の授業で光ファイバ通信の理論を講義として取り入れている。しかし光応用技術のベースとなる光学は事象の物理的理解が必須であり，一般に理論だけでこの事象の理解は困難である。このため実験は非常に重要である。実験により初めて光学部品，光計測機器，光学加工機器などの取り扱いに慣れ実践的な技術を修得する事が可能となる。光応用技術の分野でも「ものづくり」の重要性は言うまでもなくその一端を担うべく本実験教育を企画し 2006 年度より開始した。以下同実験授業で使用するテキストについて記載する。

2. テキストの内容

2-1 はじめに

センサに電源を供給し，信号伝送ラインに電線を

*1 電子制御工学科教授

*2 電子制御工学科助手

*3 電子制御工学科助教授

*4 電子制御工学科助教授

*5 電子制御工学科教授

用いる電気式センサに対して光ファイバを信号伝送ラインとしセンサ部にも電気を用いない計測法の研究開発は1970年代に「光ファイバセンサの研究」として始まり現在に至っている。光ファイバセンサの特徴は電気式センサに比べ

- ①電磁ノイズに強い
- ②防爆性に優れる
- ③電気ワイヤより光ファイバは軽量
- ④1本の光ファイバを布設するだけで空間的に何箇所かの温度、歪などの物理量の計測が可能（分布型光ファイバセンサ）といえる。このうち①②③は1970年台の光ファイバセンサ開発の黎明期から言われていたことであるが、④は1990年代中頃から光ファイバブラッググレーティング（Fiber Bragg Grating 以下FBG）センサの開発が推し進められこの技術によって可能になったもので電線を用いた従来の計測法では困難なことである。

2-2 分布型光ファイバセンサ

(1) 光ファイバ

図1に光ファイバの基本的な構造を示す。クラッドとはファイバのコアを取り囲む層で光伝送を行う際に光波を屈折率の高いコアのほうに反射させる役割を果たしている。クラッド直径は用途によりまちまちであるが、 $125\mu\text{m}$ のものが一般的に使われている。シングルモードファイバの場合コア直径は約数 μm である。

(2) 分布型光ファイバセンサの適用例

このセンサの適用分野はビル、橋梁等建築構造物の耐震性チェック（ヘルスマonitoring）、航空機の故障予防保全、送電線の積雪時などの応力管理、変圧器各部の温度測定、下水管中の広域に亘る水位の分布測定、石油プラント等防爆性が要求される個所での温度の分布測定、船舶における複数箇所の振動/歪測定等いろいろな分野に亘って研究開発が行なわれている^{1)~3)}。下水管中の水位分布測定、建築構造物などで実用化が進んでおり今後実用は一層拡大していくと考えられる。航空機の予防保全への適用、建築構造物への適用例を図2、図3に示す。

(3) 分布型光ファイバセンサの動作・構成

FBGはコアの屈折率が光の進行方向に対して直角に周期的に変化しており一種の狭帯域反射光フィルタである。図4にFBGの顕微鏡写真の例を示す。コアの屈折率 n が光の進行方向（光軸方向）に対して直角に周期的に変化していることが分る。この光軸方向の屈折率変化は光リソグラフィ手法を用いて実現

される。またこの周期 Λ は $0.5\mu\text{m}$ 程度である。外観は通常の光ファイバと変わらない。図5にFBGの反射特性の一例を示す。この反射中心波長 λ_B は(1)式で示される。

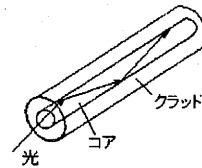


図1 光ファイバにおける導波

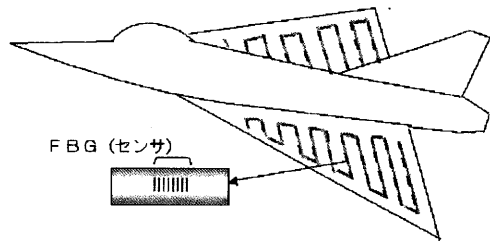


図2 分布型光ファイバセンサの航空機への適用

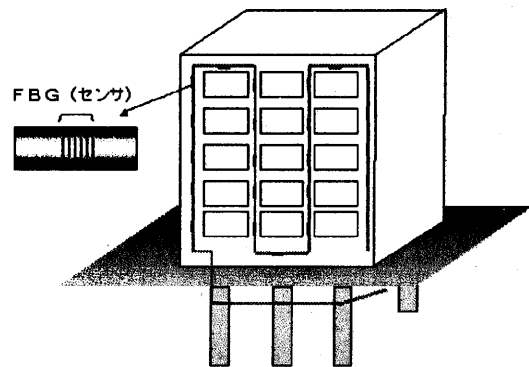


図3 分布型光ファイバセンサの建築構造物への適用

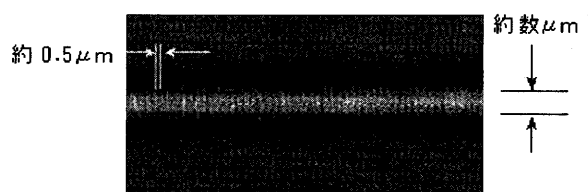


図4 FBGの顕微鏡写真

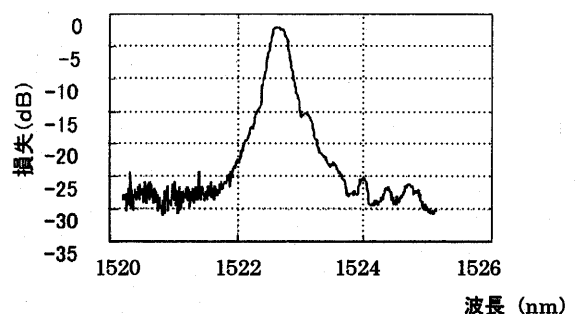


図5 FBGの反射特性の一例

$$\lambda_B = 2n\Lambda \quad (1)$$

反射中心波長 λ_B は FBG に印加される歪 ϵ により変化する。この変化分 $\Delta\lambda_B$ は(2)式

$$\Delta\lambda_B = (1 - p_e)\lambda_B\epsilon \quad (2)$$

で示される。ここで p_e は P_{11} , P_{12} を光ファイバの光学弾性定数、 ν を光ファイバのポアソン比として(3)式により求められる。

$$p_e = \frac{n^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \quad (3)$$

光ファイバの場合一般に $\nu = 0.19$, $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.270$, $n = 1.451$ である。FBG の反射中心波長 λ_B は FBG の温度 T によっても変化する。この場合変化分 $\Delta\lambda_B$ は(4)式で示される。

$$\Delta\lambda_B = \left[\frac{1}{\Lambda} \frac{\delta\Lambda}{\delta T} + \frac{1}{n} \frac{\delta n}{\delta T} \right] \lambda_B \Delta T \quad (4)$$

光ファイバの場合一般に

$$\frac{\delta\Lambda}{\delta T} = 0.35 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

$$\frac{\delta n}{\delta T} = 0.29 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$$

である。以上のことから FBG を用いて温度センサ、歪みセンサを構成することができる。これを模式的に図 6 に示す。更に複数の中心波長が互いに異なっ

た FBG を用い、これらを光ファイバで接続したシステムを図 2, 図 3 の様に構成すれば空間的に異なった個所の温度、歪みなどを 1 本の光ファイバで計測することができる (FBG を用いた分布型光ファイバセンサ)。このシステムの一般的な構成を図 7 に示す。このシステムの動作を述べると以下のようなものである。同図において広帯域光源から出射された光は光カプラ経由光ファイバ内に構成された N 個の FBG により反射される。各 FBG の反射波長は温度、歪みで変化する。各々の FBG の反射波長の変化する範囲は温度、歪みの測定範囲でラップしないように設計されている。各 FBG で反射された反射波長は光カプラを逆方向に通過し光波長検波器に到達する。そして光波長検波器で各々の FBG の反射波長が計測され各 FBG の温度、あるいは歪等が計測される。

(4) 実験

(4.1) 使用する機器の仕様

実験に使用する主な光学機器は以下の 14 点である。何れも添付仕様書をよく読んだ後、実験を行うこと。

① 光ファイバ

日立電線製, SM1005(UV), 100m 及び 1km

② FBG1

Broptics Communications Corp 製, Serial No.:0510 3003-002, Central Wavelength 1549nm

特定波長の反射、透過が可能

温度変化、歪みにより反射波長が変化

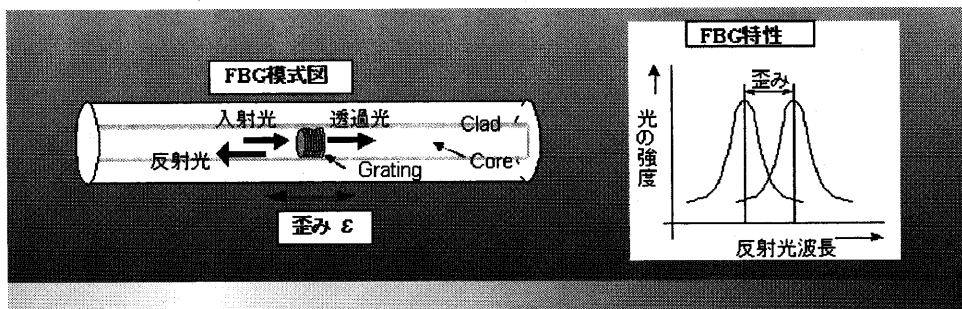


図 6 FBG のセンサとしての動作

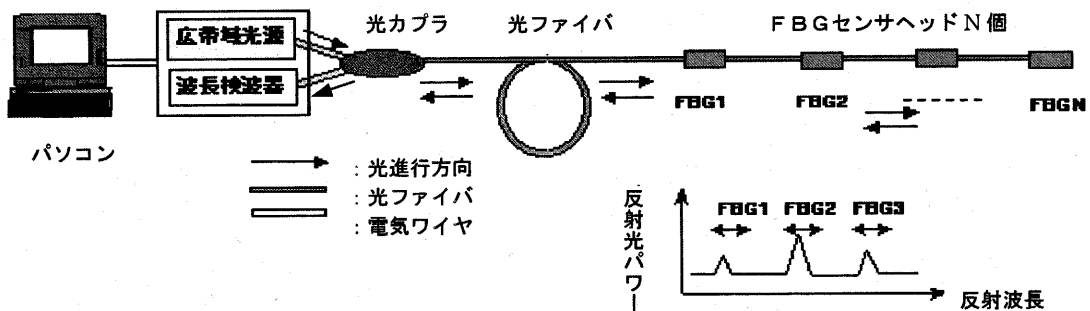


図 7 FBG を用いた分布型光ファイバセンサ

- ③ FBG2
Broptics Communications Corp 製, Serial No. : 051
03003-003, Central Wavelength 1549nm
- ④ FBG3
Broptics Communications Corp 製, Serial No. : 050
428-526, Central Wavelength 1548nm
- ⑤ FBG4
Broptics Communications Corp 製, Serial No. : 050
428-527, Central Wavelength 1548nm
- ⑥ 広帯域光源
Fiber Labs 製, ASE-1550-10
- ⑦ 光スペクトラムアナライザ
アンリツ製, MS9710B
- ⑧ Multi-Wavelength Meter(光波長計)
アジレントテクノロジー製, 86120C
- ⑨ Fiber Inspection Scope
THORLABS 製, CL-200
- ⑩ファイバストリッパ1
昭和電線電纜製, PB Stripper

- ⑪ファイバストリッパ2
住友ハイプレジジョン製, OF-D
- ⑫ ファイバアダプタ
アンリツ製, MA9013A
- ⑬ 光ハンディパーワメータ (以下光パーワメータ)
アンリツ製, ML9002A
- ⑭ ファイバカッター
古河電工製, S323

(4.2) 光ファイバの光伝送損失測定実験

【目的】分布型光ファイバセンサの実験を行う前に光ファイバ伝送の基礎事項である光ファイバの光伝送損失の測定実験を行う。光ファイバが従来使われている同軸ケーブルに比し伝送損失がいかに小さいか(同軸ケーブル伝送損失例 0.5dB/m, 光ファイバ伝送損失例: 0.5dB/km) 理解する。光ファイバの伝送損失 L (dB/km) は(5)式で算出される。

$$L(\text{dB/km}) = P1(\text{dBm}) - P2(\text{dBm}) \quad (5)$$

但し $P1(\text{dBm})$ は図8の(1)での光パーワメータの測

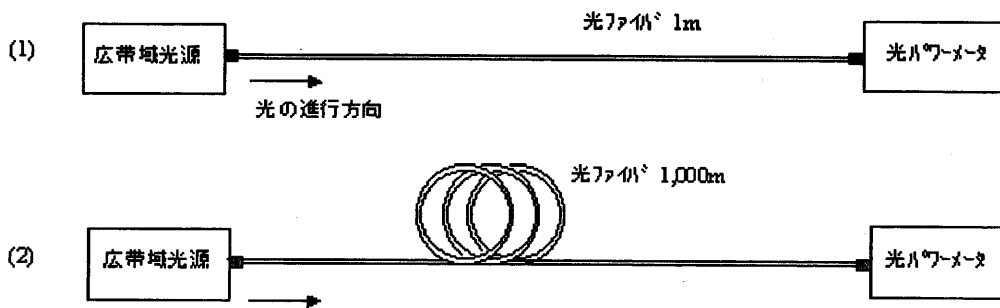


図8 光ファイバの光伝送損失測定

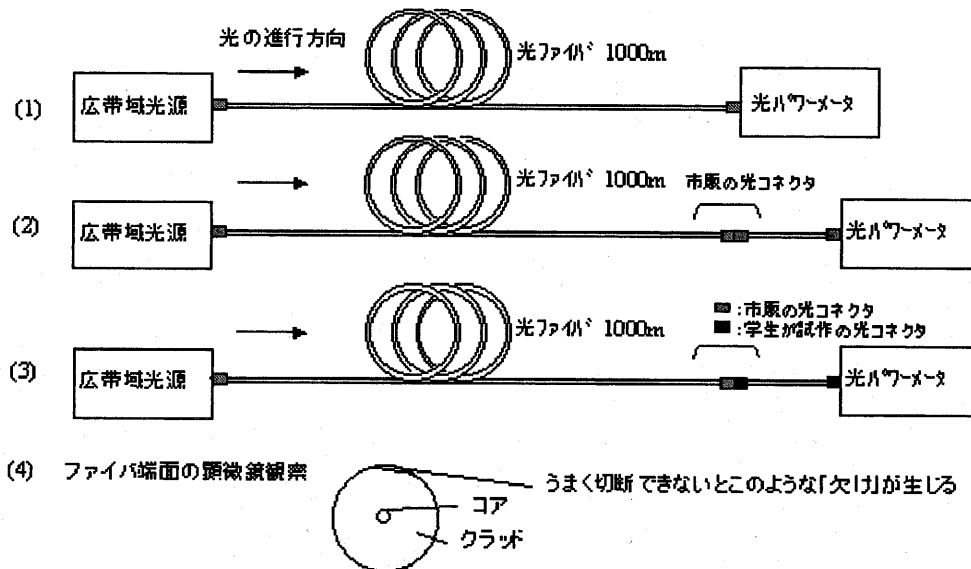


図9 光コネクタ接続損失の測定

定値, $P_2(\text{dBm})$ は同図(2)での光パワーメータの測定値である。

【実験方法】図8の(1)及び(2)の実験セットアップを使用して光パワーメータにより光源からの光パワーを計測し光ファイバの伝送損失を算出する。この実験は学生一人一人が行うこと。

(4.3) 簡易光コネクタの作成 (接続損失測定)

【目的】本実験は分布型光ファイバセンサの実験を行う前に知っておくべき光ファイバ伝送の基礎事項である光コネクタの接続損失測定の実験である。①光ファイバの被服除去法, 切断方法, 接続方法を電線の場合と比較して理解する。②切断面を顕微鏡で観測し光ファイバが実際に光を導いていることを理解する。③学生自身が光ファイバを実際に接続しその接続損失を測定する。またその値を市販の光コネクタの場合と比較し市販の光コネクタの損失が自作の簡易コネクタより小さい事を確認する。

【実験方法】ファイバストリッパ⑩または⑪により光ファイバのプラスチック被覆を剥がす。ファイバカッタ⑬を用いて光ファイバアダプタ⑫に適した長さにファイバを切断する。切断されたファイバを光ファイバアダプタ⑫に挿入すれば簡易コネクタが完成する。光ファイバの両端をこの簡易コネクタとし図9の(3)の実験を行う。このときコネクタの接続損失 $L_c(\text{dB})$ は市販の光コネクタの場合は(6)式で, 自作の簡易コネクタの場合は(7)式で与えられる。

$$L_c(\text{dB}) = P_1(\text{dBm}) - P_2(\text{dBm}) \quad (6)$$

$$L_c(\text{dB}) = P_1(\text{dBm}) - P_3(\text{dBm}) \quad (7)$$

但し P_1, P_2, P_3 は各々図9の(1), (2), (3)の光パワーメータの測定値である。次に Fiber Inspection Scope ⑨を用い図9の(4)に示すように自作した簡易コネクタの端面を観察し作図する。また光ファイバの他端面から光を入射させコアに光が到達していることを確認する。この実験は学生一人一人が行うこと。

(4.4) 分布型歪み/温度測定実験

【目的】FBG素子を用いると1本の光ファイバで複数個所の歪計測が同時に可能(波長多重計測が可能)なことを理解する。具体的には図10(図11)においてFBG2(FBG1)に印加された歪/温度はFBG4(FBG3)の反射スペクトルとは無関係にFBG2(FBG1)単独の反射スペクトルとして独立に計測できることを理解する。

【実験方法(歪印加実験)】実験は受講生10人を2グループに分けて行う。一方のグループは波長計測のための装置として光波長計を用いた図10の実験系を, 他のグループは波長計測のための装置として光スペクトラムアナライザを用いた図11の実験系を組み上げる。各グループの学生は各自順番にそれぞれの実験系を用いて実験を行う。FBG2(FBG1)に光学ステージで歪を加えその反射スペクトラムを測定す

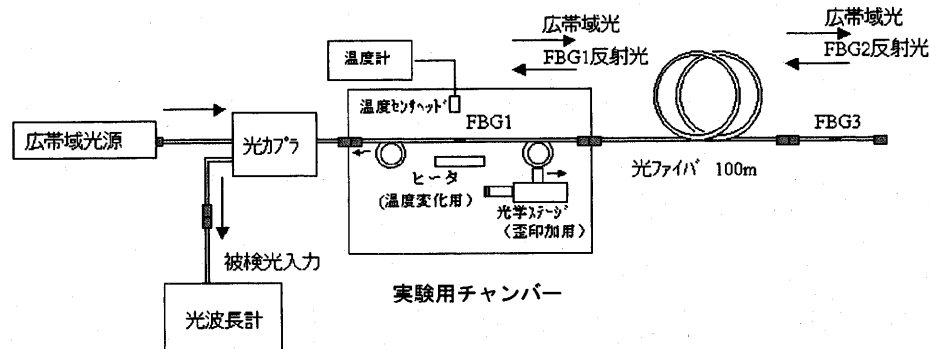


図10 分布型歪み/温度測定システム(光波長計使用の場合)

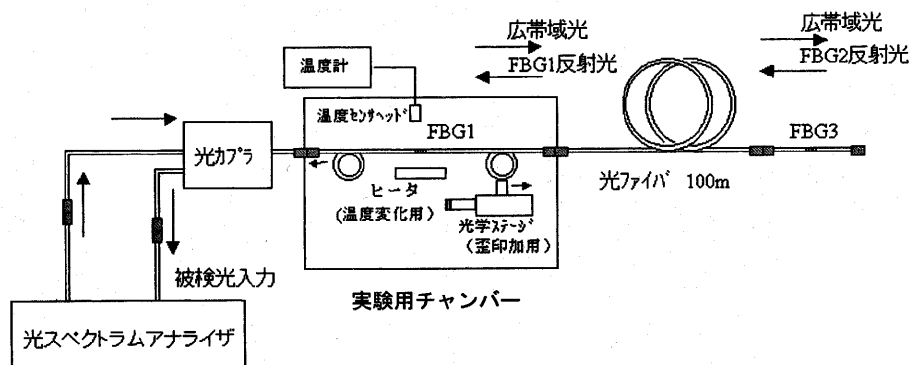


図11 分布型歪み/温度測定システム(光スペクトラムアナライザ使用の場合)

る。測定開始時においてFBG2 (FBG1) はたるんでいることを目視により確認しておき、徐々に光学ステージによりFBG2 (FBG1) にテンションを印加していく。反射中心波長 λ_B の変化分 $\Delta\lambda_B$ が1nmになったらテンションをそれ以上印加するのはやめ光学ステージのマイクロメータの読みと反射中心波長 λ_B の関係をグラフにする。データはマイクロメータの読みを10 μ mずつ変化させ測定していく。一例を図12に示す。

【実験方法 (温度実験)】図10 (図11) の実験系を組み上げる。温度実験は時間がかかるため各グループがそれぞれの実験系を用いて5人1組で実験を行う。これらの実験系において実験用チャンバーを断熱材の発泡スチロールで囲む。次にFBG2 (FBG1) の温度をヒータに100ボルトを約30分印加し温度計の値が40 $^{\circ}$ Cになったらヒータの電源をオフにする。自然冷却により温度が1 $^{\circ}$ C低下する毎にFBG2 (FBG1) の反射中心波長を光スペクトラムアナライザまたは光波長計により測定する。温度が25 $^{\circ}$ Cになったら実

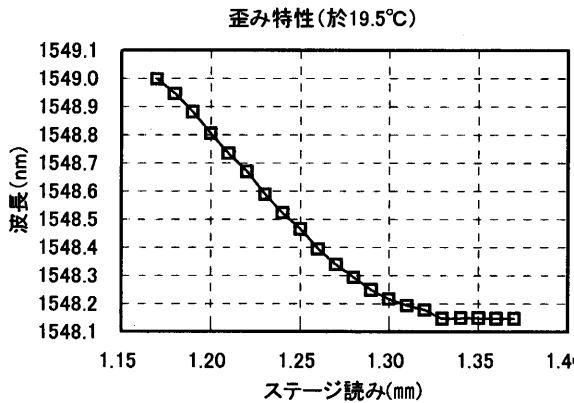


図12 FBGの歪み印加特性

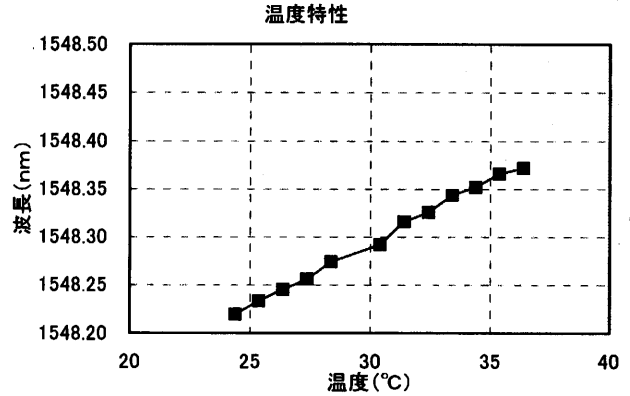


図13 FBGの温度特性

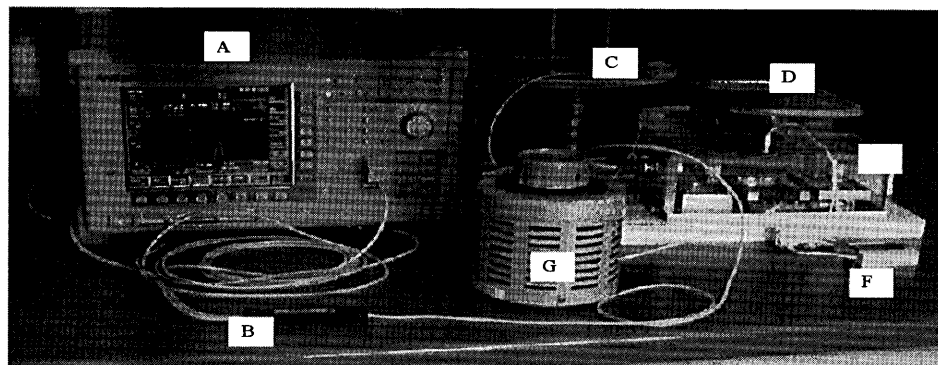


図14 実験システム構成 (光スペクトラムアナライザを使用の場合)

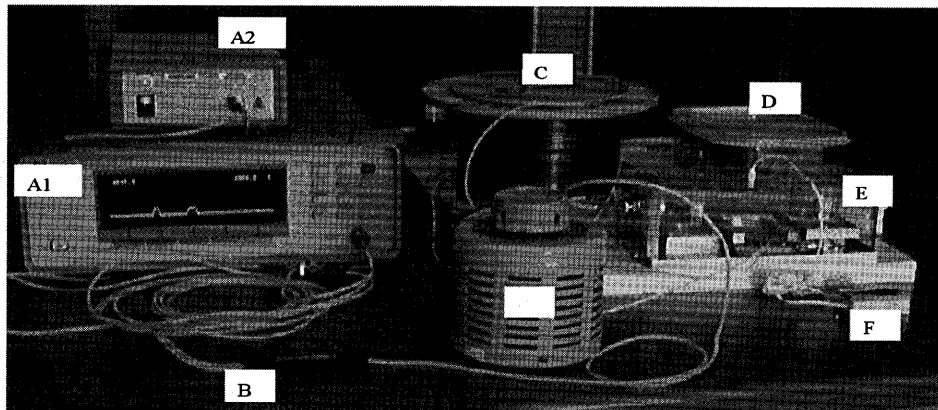


図15 実験システム構成 (光波長計, 広帯域光源を使用の場合)

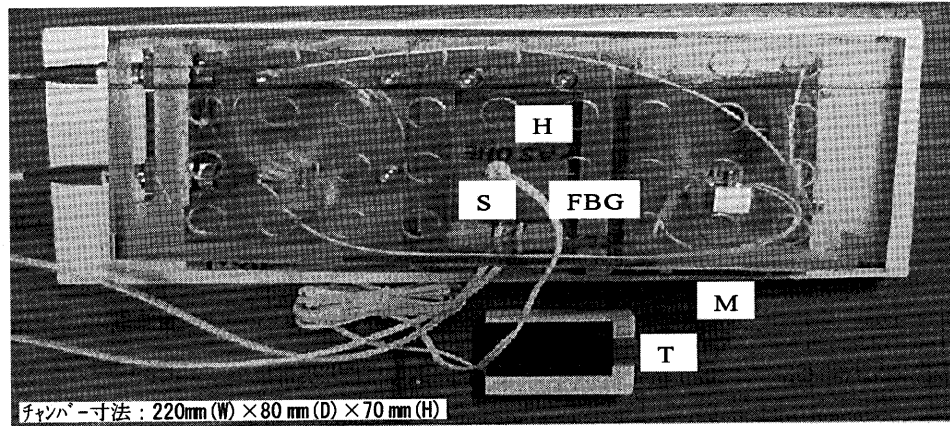


図 16 実験用チャンバ

験を終了する。なお実験開始時においてFBG2 (FBG1) はたるんでいることを目視により確認しておくこと。データの一例を図13に示す。

図14に光スペクトラムアナライザを用いた場合の実際の実験システム構成(図11に相当)の写真を示す。図15に光波長計, 広帯域光源を用いた場合の実際の実験システム構成(図10に相当)の写真を示す。図14, 図15においてアルファベット各記号は以下のものを示す。

- A: 光スペクトラムアナライザ
 - A1: 光波長計
 - A2: 広帯域光源
 - B: 光コブラ
 - C: 光ファイバ (100m)
 - D: FBG3 又は FBG4
 - E: 実験用チャンバ (含 FBG1 又は FBG2)
 - F: 温度センサ表示部 (図14, 図15)
 - G: ヒータ制御用スライダック
- また図16は実験用チャンバの平面写真である。同図においてアルファベット各記号は以下のものを意味する。
- S: 温度センサヘッド (図16)
 - T: 温度センサ表示部 (図16)
 - H: ヒータ
 - M: 光学ステージ
 - FBG: Fiber Bragg Grating (FBG1 又は FBG2)

2-3 報告事項

- (1) (5)式から光ファイバ伝送損失 L (dB/km) を求めよ。このとき P_1 (dBm) もデータとして示すこと。
- (2) (6)式および(7)式から簡易コネクタと市販コネクタの接続損失 L_c (dB) を求めよ。このとき P_1 (dBm), P_2 (dBm) 及び P_3 (dBm) も同時にデータとして示すこと。
- (3) ファイバの端面を Fiber Inspection Scope を用い

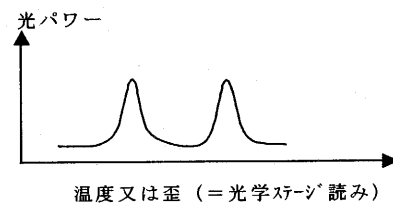


図 17 2つのFBGからの反射スペクトル

て観測した絵を手書きで示せ。

(4)FBG1 あるいはFBG2 を歪みセンサとして用いた際の図12に相当するグラフを実験データから作成せよ。ただしFBG3 あるいはFBG4 の印加歪に対する反射中心波長の変化も同一グラフ上に描くこと (FBG3 あるいはFBG4 の反射中心波長が変化しないことを示す)。

(5) FBG1 あるいはFBG2 を温度センサとして用いた際の図13に相当するグラフを実験データから作成せよ。ただしFBG3 あるいはFBG4 の印加温度に対する反射中心波長の変化も同一グラフ上に描くこと (FBG3 あるいはFBG4 の反射中心波長が変化しないことを示す)。

(6) 図10 あるいは図11において光波長計あるいは光スペクトラムアナライザに2つのFBGから反射してきた光波長を測定させこのときの波長に対する光パワー密度 (反射光スペクトル) のグラフを(図17参照) その実験条件とともに示せ。

(7) (2)式あるいは(4)式によれば $\Delta \lambda_B$ は歪あるいは温度に直線的に比例するはずである。しかし実験では図12 あるいは図13のように非線形性が生じる。この理由を考察し述べよ。

(8) (4) (5)の実験結果はFBGを用いた光波長多重により空間的な分布計測が実現できることを示している。広帯域光源の帯域幅 $\Delta \lambda_s$ とFBGの反射中心波長の変化幅 $\Delta \lambda_B$ から求められる多重数(一本の光ファイバ

でいくつのセンサを計測できるかを表す数)を示す式を導け。その式を使用して $\Delta\lambda_s=100\text{nm}$, $\Delta\lambda_B=1\text{nm}$ の場合多重数がいくつになるか示せ。

3. おわりに

光ファイバの伝送損失の測定, 光ファイバの切断, 簡易型光コネクタの製作, 同光コネクタの接続損失の光パワメータによる測定, 更に光コネクタの端面の顕微鏡による観察などを経験できるようにした。その上で光ファイバブラッググレーティング (FBG) 用いた分布型温度センサシステム, 同分布型歪センサシステムを構築させ FBG からの反射スペクトルを実際に光スペクトラムアナライザ/光波長計を用いて測定することにより現在の光ファイバ通信分野・光ファイバセンサの分野での代表的な先端技術である「波長多重技術」を理解できるような実験テキストとした。

本実験授業は週2時間3週間にわたる計6時間の電子制御工学科本科5年生を対象とした必修授業である。時間のかかる温度実験を除く他の実験すべて学生一人一人が実験を行い光ファイバ, 光波長多重について理解が深まるようにした。ただし温度実験も波長計測可能な設備を2種類(光スペクトラムア

ナライザ, 光波長計) 準備し小人数(5人)での実験ができるようにした。今後学生の理解度の確認, 学生の意見などを基に改善すべき点などをまとめて別途報告する予定である。

謝辞

本実験教育は本校の平成17年度の特別経費, 及び電子制御工学科の特別配分をうけた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) A. D. Kersey, T. A. Berkoff, and W. W. Morey "Multiplexed Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter", *Opt.Lett.*, vol. 18, pp.1370-1372, 1993.
- 2) Y.Sano and T Yoshino, "Fast Optical wavelength Interrogator employing Arrayed Waveguide Grating for Distributed Fiber Bragg Grating Sensors", *IEEE J.Lightwave Technol.*, vol.21, pp.132-139, 2003.
- 3) 制震・免震構造物へのヘルスマニタリングシステムの適用, 岩城英朗, 岡田敬一, 白石理人, 柴慶治, 三田彰, 武田展雄, JCROSSAR論文集, pp583-590, 2003年