

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 29 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2012

課題番号：23760316

研究課題名（和文）

CO₂ レーザによる光ファイバの微細加工と光ファイバセンサへの応用に関する研究

研究課題名（英文）

Optical fiber microfabrication by CO₂ laser and the application to optical fiber sensor

研究代表者

小山 長規 (KOYAMA OSANORI)

大阪府立大学・工学研究科・助教

研究者番号：10336802

研究成果の概要（和文）：

CO₂ レーザを使用し光ファイバの特性を制御することを目的とした微細加工技術について研究し、照削に必要な最小エネルギーや LPFG(Long Period Fiber Grating)のグレーティングピッチと共振波長の関係などを明らかにした。これを基に一心の光ファイバに 5 つの LPFG を多重した温度分布センサを作成し複数点の同時温度センシングが可能であることを確認した。また LPFG の温度感度について評価した。

研究成果の概要（英文）：

Optical fiber microfabrication techniques by using a CO₂ laser have been investigated to control the characteristic of optical fiber. In this research the minimum energy for optical fiber carving and the relationship between resonant wavelength of LPFG (Long Period Fiber Grating) and grating pitch were clarified. Based on the result, a distributed temperature sensor with 5 LPFGs multiplexed in one optical fiber was fabricated. Furthermore it was evaluated from the point of view of the temperature sensitivity and multiple points sensing.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電子デバイス・電子機器

キーワード：センシング

1. 研究開始当初の背景

通信量の増大に対応するため、広帯域光ネットワークが研究されていた。またこれを支える波長多重用の光合分波部品や、長距離伝送用の光アンプ部品などの更なる高機能化が研究されていた。研究代表者は、この種の部品に光コネクタを取り付ける際にファイバ被覆を機械的に除去するため、このとき残るファイバ長(余長)により装置の小型化が妨げられていることを見出した。これを解決するため、CO₂ レーザで被覆を焼却する斬新な手法を提案し、余長がない光部品の接続が可能で、接続部を含む光部品の寸法が、従来法に比べ 1/10 以下に小型化できることを示した。この研究中に、CO₂ レーザの照射に

よりファイバの表面を削ることができることを見出した。照射により削るため、ここでは、照削(しょうさく)とよぶ。CO₂ レーザ光照射によりファイバの 1 部を所望形状に照削し、結果としてファイバ表面に微細加工を施すことで、ファイバ中の導波光を制御できると考えた。当時ファイバをレーザで照削する研究は殆どなく、安定な石英材料を一瞬で削る現象は現在においても不明な点が多い。CO₂ レーザを光ファイバへ照射する研究は、長周期ファイバグレーティング(LPFG: Long Period Fiber Grating)を作成する目的で数多く行われていたが、照削を導入した LPFG の研究は無かった。研究代表者の先行研究において照削部に LPFG を形成すると照削しない場

合と比べ LPFG の共振波長が短波長側にシフトすることが確認できていたが、照削に関する定量的な分析が不十分であり、照削を施した LPFG の応用方法などが研究課題であった。

2. 研究の目的

本研究では、CO₂ レーザ光照射により石英系光ファイバの 1 部を所望形状に削除(ここでは照削とよぶ)し、結果としてファイバ表面に微細加工を施すことで、分布センサなどの新機能を実現することを目的とする。高温で石英が削られる照削現象は、現在未解明であるが、レーザ照射条件と照削量の基礎的な関係を実験的に明らかにする。評価の基本は、照削形状と照削した部分に付加するグレーティングによる導波光への影響解明で、具体的な応用は、分布温度センシングを対象とする。

3. 研究の方法

平成 22 年度に、次の(1)から(4)についての研究を進めた。(1) 照削・LPFG 書込システムの構築、(2)照削に必要な最小エネルギー、(3) 照削量と LPFG 共振波長シフト効果、(4)LPFG スペクトルの再現性の向上

平成 23 年度に、次の(5)から(6)についての研究を進めた。(5)石英微細粒の再ガラス、(6) 温度分布センサの作成と評価

4. 研究成果

3 節で示した(1)から(6)の研究成果について詳細に報告する。

(1) 照削・LPFG 書込システムの構築

CO₂ レーザ光によるファイバの照削と LPFG の書込みシステムを図 1 に示す。CO₂ レーザは、10.6 μ m の波長の光を CW 発振し、出力パワーと yz 軸方向のスキャンをパソコン(PC)からコントローラ 1(CR1)を経由して制御できる。スポットサイズは、0.163mm である。ファイバは CR2 により z 軸方向の移動を制御できる 1 対の微動台に固定する。図 2 に示すようにファイバ軸に直交する y 方向に CO₂ レーザ光を出力して長さ L_c だけスキャンする(図 2 の実線)。次に CO₂ レーザ出力を遮断して、次の直交スキャンの開始点に移動する(図 2 の破線)。照削の場合はピッチ p_c だけ z 軸方向に移動し、次の直交スキャンを行う。これ以降、長さ L まで直交スキャンを繰り返す。この長さ L に渡るスキャンを 1 回行うことを n=1 と表し、更に照削する場合は n を増加させる。LPFG を書き込む場合も、スキャン方法は同じで、グレーティングのピッチとして p_g を指定する。p_g は通常サブ mm の値であるが、照削の場合スポットサイズ以下の値をとり p_c = 0.03 mm とした。

(2) 照削に必要な最小エネルギー

図 2 に示すスキャンでファイバを照削したとき、ファイバ表面に照射した CO₂ レーザのエネルギー E は次のように表現できる。

$$E = ntP/L = 2naP/p_c V \quad (1)$$

ここで、t はファイバ表面への照射時間、2a

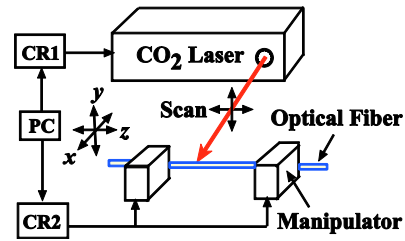


図1 照削・LPFG 書込システム

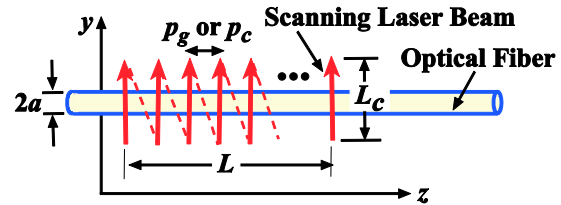


図2 レーザ光のスキャン方法

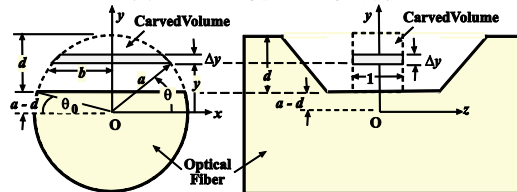


図3 一定長照射したファイバの照削体積

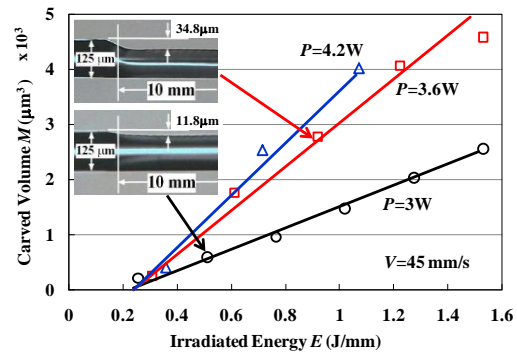


図4 照射エネルギーと照削体積の関係

はファイバ直径(125 μ m)である。ファイバ表面から深さ d だけ照削したとき、単位長さ当たりの照削堆積 M は、図 3 の記号を用い

$$M = a^2(\pi/2 - \theta_0) - (a-d)[d(2a-d)]^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 $\theta_0 = \sin^{-1}(a-d)/a$ である。この式から深さ d を測定すると M が計算できることがわかる。照射エネルギーと照削堆積の関係を明確化するため、照射条件を変えてファイバを照削し、深さ d を測定した。測定した深さ d から、式(2)を用いて M を計算した。エネルギー E を式(1)から計算し、E と M の関係を図 4 にプロットした。図 4 から、

$$M \propto \alpha(E - E_0) \quad (3)$$

で表せることがわかる。ここで、 α と E_0 は定数である。照削は、局所的に加熱された石英が気化することで生じるから、 E_0 は気化に必要な最小照射エネルギーと考えられ、実験から $E_0 = 0.23$ J/mm が得られた。

(3) 照削量と LPFG 共振波長シフト効果

ピッチ 0.5mm で長さ 30mm に渡り、グレーティングを書込み、LPFG を 2 本作成した。ただし、1 本はファイバ表面を 30mm 長に渡り照削した後、グレーティングを書込んだ。それぞれの損失波長特性の測定結果を、図 5 に示す。この結果から、照削により共振波長をシフトさせることが出来ることがわかった。同様に、ファイバ軸方向に照削する回数を増やし、照削深さを増加させた後にグレーティングを書き込んだ LPFG の共振波長を測定した結果を図 5 に示す。照削の深さが増加すると、共振波長は短波長側にシフトし、シフト量が増加することがわかった。これよりグレーティングピッチが同じ 0.5mm でも、照削深さを変えると共振波長を変化させられることがわかった。

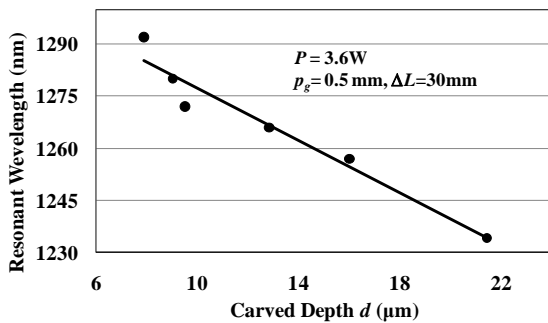


図 5 照削の深さと共振波長シフトの関係

(4) LPFG スペクトルの再現性の向上

図 1 に示したシステムを用い、ファイバに LPFG 書込み(LPFG 長 30mm, 1ヶ所)を、数回にわたり同条件で行った。その結果、LPFG のスペクトルの再現性に問題があることが確認され、その最大の原因が LPFG 書込み時のファイバにかかる張力の誤差であると判明した。これを改善するため光ファイバにかかる張力を一定にすることを目的に、LPFG 書込みシステムを図 6 のように改善した。片方の微動台のファイバホルダを開放し、その先の光ファイバにおもりを付加することで、LPFG 書込み時にファイバにかかる張力を一定に保つ。これにより LPFG のスペクトルにおける共振波長の再現性を飛躍的に向上できた。

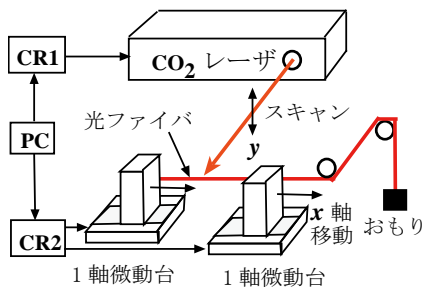


図 6 張力を考慮した LPFG 書込みシステム

(5) 石英微細粒の再ガラス

CO₂ レーザを照射して照削実験を行ったところ、石英が照削されるものの、照削部に石英微細粒が白く堆積する予想外の結果となった。この様子を図 7 に示す。高温で昇華した石英分子が結晶化しているものと推定された。本現象は、光部品に局部的に石英を追加する加工法につながる可能性があると考え、石英微細粒を再加熱し再ガラス化する加熱法を検討した。石英微細粒に対し CO₂ レーザ再照射、光ファイバ融着接続機のアーク放電を実際に行ったが、結果として再ガラス化はできなかった。明確な成果を得られなかったが、再ガラス化技術は光ファイバへの部分的ガラス追加技術となり光ファイバの特性制御を可能とする新技術となりえると考え。

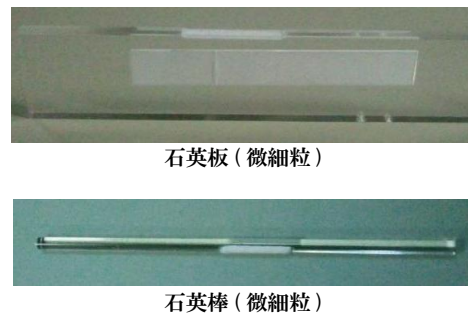


図 7 CO₂ 照射による石英微細粒の堆積

(6) 温度分布センサの作成と評価

LPFG は電磁干渉の影響を受けない、電力不要、遠隔モニタ可能などの利点がある。これらの特徴を利用して、原子力発電所等の大規模設備の高温部分を検出することで、災害等によって誘起される内部異常をモニタすることが考えられるが、このような検討はなされていなかった。このためには、LPFG で温度分布を検出する必要があるが、これには異なる共振波長 λ_R を 1 心の光ファイバ多重した多重 LPFG を作成する必要がある。この目的のため CO₂ レーザで光ファイバ表面を照削すると、非照削 LPFG と比べて λ_R がシフトすること[(3)成果]を多重化に適用した。多くの λ_R を多重するためには、照削以外の方法も検討する必要がある。1つの方法は、グレーティングのピッチ p_g を変える方法があるが、対象波長域で λ_R が多数現れる場合は不適であるので、どのような p_g が適するか検討する必要がある。本研究では異なる p_g を用いて 5 つの λ_R を多重した。

本研究で想定する大規模設備の温度分布測定を図 8 に示す。1 本の光ファイバに共振波長 λ_R が異なる LPFG1, LPFG2, ... を設けると、光スペアナ(OSA)で測定すると対応する λ_{R1} , λ_{R2} , ... が出力光のスペクトルに多重される。 λ_R は温度依存性をもつため、各 LPFG が異なる温度 T_1, T_2, \dots となったとき、各 λ_R から、対応する場所の温度が測定可能である。

LPFG の共振波長 λ_R は位相整合条件

$$\lambda_R = (n_{01} - n_{0m}) p_g \quad (4)$$

によって決まる。ここで、 n_{01} はLP₀₁ コアモードの実効屈折率、 n_{0m} はLP_{0m} クラッドモードの実効屈折率である。式(3)から p_g を変化させると λ_R も変化することがわかり、 p_g を変えた LPFG を作成した。図 9 に作成結果から得られた p_g と λ_R の関係をまとめたものを示す。作成実験では CO₂ レーザのスキアン速度 $V=45$ mm/s 出力パワー $P=3$ W とし、ピッチ $p_g = 0.480, 0.492, 0.500, 0.510, 0.530, 0.540$ mm で書き込んだ LPFG をそれぞれ作成し、損失波長特性を測定した結果を図 10 に示す。 p_g が 0.530 mm 以上では、ピーク値が小さく、かつ複数のピークが現れたため、多重に適さない。0.530 mm 以下の p_g では明瞭な主ピークが 1 つあるスペクトルが得られた。 $p_g = 0.530$ mm が境となる理由は不明であるが、 $p_g < 0.530$ mm で LPFG を作成すると多重に適したスペクトルが得られる。多重用にピッチ $p_g = 0.480, 0.486, 0.492, 0.500, 0.520$ mm で 5 本の LPFG を作成し、スペクトルを測定した結果を図 11 に示す。 $p_g = 0.520$ mm のスペクトルは長波長側にサブピークがあるが、主ピークを対象の λ_R とできる。 $p_g = 0.520$ mm 以外の LPFG は、主ピークのみがあり、これを合わせて 5 つの λ_R を多重できる。作成した 5 本の LPFG を接続し、多重 LPFG としての損失値と、個別の損失値の和とを比較した結果を図 12 に示す。両者は、ほぼ類似し、また多重しても λ_R のピーク値は区別できることがわかる。

λ_R の温度依存性を測定するために、作成した多重 LPFG を恒温槽に入れ、10°C~70°C 間で

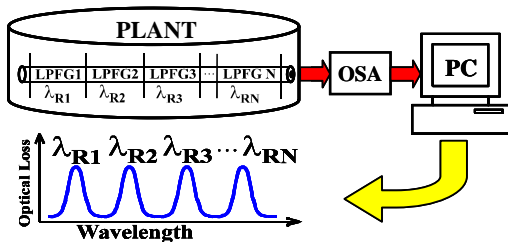


図 8 LPFG による高温異常部の検出

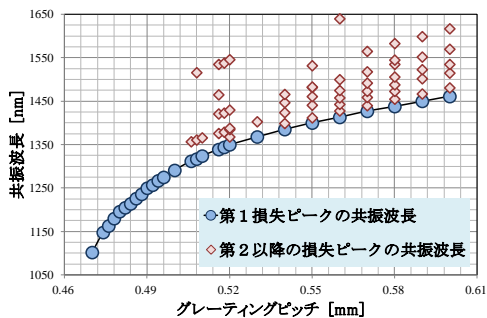


図 9 グレーティングピッチと共振波長

10°C ごとに温度を変化させ、各温度でスペクトルを測定した。図 13 に第 2 ($p_g=0.486$ mm) の LPFG のスペクトル測定結果を示す。図 14 の○印は λ_R を示し、温度が上昇するにつれて λ_{R2} は長波長側へシフトした。同様に他の LPFG の λ_R の温度依存性を測定した結果を図 15 に示す。各 λ_R は温度に比例して増加し、その温度係数は nm/°C を単位とし、 λ_{R1} では

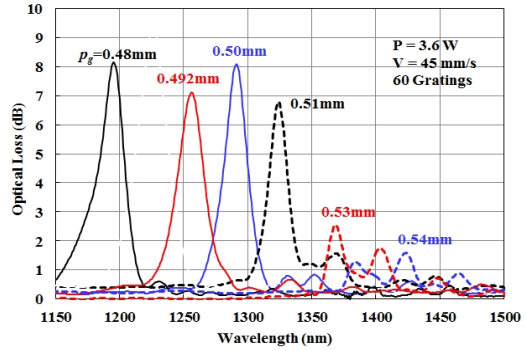


図 10 ピッチ p_g と共振波長

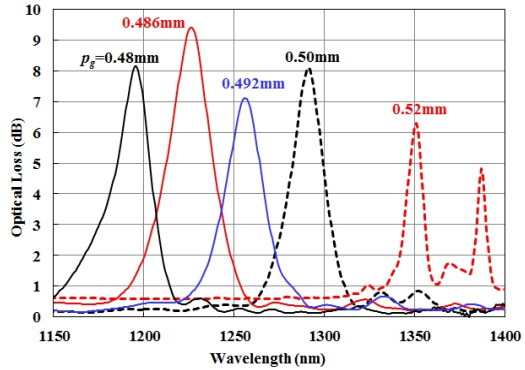


図 11 多重用に作成した 5 本の LPFG

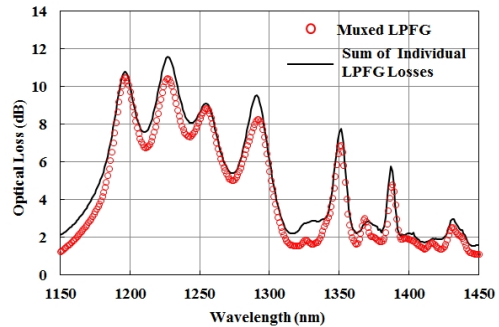


図 12 多重 LPFG の損失値の比較

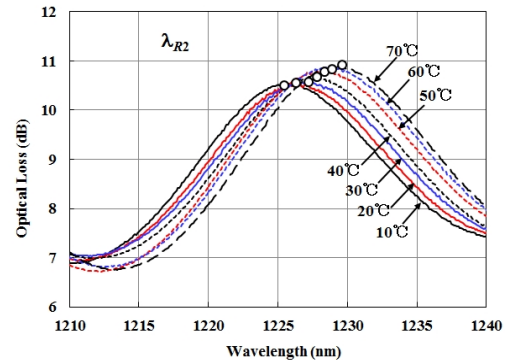


図 13 温度変化による共振波長の変化

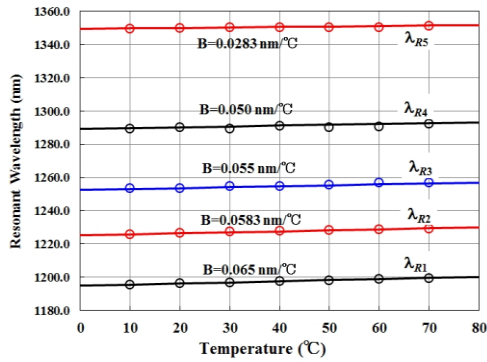


図 14 共振波長の温度の依存性

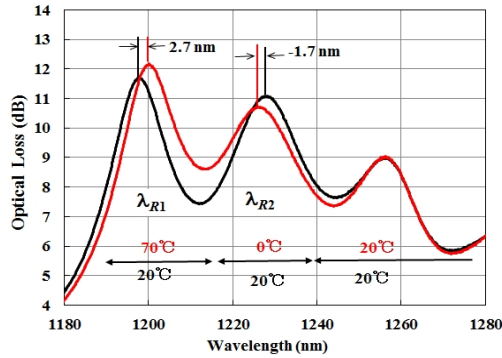


図 15 0°C, 70°Cを与えた LPFG の λ_R 変化

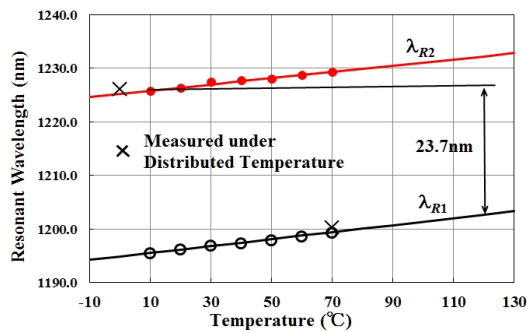


図 16 温度差 100°Cの場合のピーク間隔

0.065, λ_{R2} では 0.0583, λ_{R3} では 0.055, λ_{R4} では 0.050, λ_{R5} では 0.0283 であった。この結果より LPFG を多重させても各 LPFG で λ_R は温度に依存し、 λ_R 測定から温度測定が可能であることがわかった。

作成した多重 LPFG で温度分布を測定するため、最初に全 LPFG 1~LPFG5 の温度を 20°C に設定してスペクトルを測定した。次に、LPFG1 を 70°C に、LPFG2 を 0°C に、LPFG3~5 を 20°C に設定してスペクトルを測定した。 $\lambda_{R1} \sim \lambda_{R3}$ の結果を図 16 に示す。この結果から 20°C の値に比べて λ_{R1} は 2.7nm 増加し、 λ_{R2} は 1.7nm 減少し、 λ_{R3} は変化しなかった。また、温度差 70°C で λ_{R1} と λ_{R2} のピークは分離しており、ピーク値をモニタすることで 70°C の温度差は測定できることがわかる。

図 14 に示した λ_{R1} と λ_{R2} の温度依存性を取り出し、その上に図 15 の 70°C の λ_{R1} と 0°C の λ_{R2} の値をプロットした結果を図 16 に示す。温度分布を与えて測定した λ_{R1} と λ_{R2} の値は、均

一温度での値と一致することがわかる。また、図 15 には、LPFG2 が 20°C で LPFG1 が 120°C になった場合の λ_R の外挿値の比較を示し、温度差が 100°C ある場合でも両ピーク間は 23.7nm 離れていることがわかる。

大規模設備の災害誘起高温度分布センシングを想定し、異なる共振波長 λ_R をもつ多重 LPFG による 100°C 以上の温度分布測定を目標として検討を行なった。CO₂ レーザによりピッチ p_g を変化させることにより、異なる共振波長 λ_R を 5 つ多重した LPFG を作成した。作成した多重 LPFG は 100°C の温度差でも温度分布を測定可能であることを示した。今後は多重数を増やすために共振波長の半値幅の先鋭化などを行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 8 件)

- ① 笠原三郎, 徳永裕, **小山長規**, 勝山豊 “大規模設備の災害誘起高温度分布測定用 LPFG” 平成 24 年電気関係学会関西支部連合大会 p.P-21, 関西大学, 12 月 8 日, 2012.
- ② **O.Koyama**, T.Kanamori, K.Kawanishi and Y.Katsuyama “Web-Based Refractive Index Monitoring System, Employing LPG-FBG Hybrid Optical Sensors” OFS-22, pp.8421B6-1 ~ 8421B6-4, Beijing, China, Oct. 20, 2012.
- ③ **O.Koyama**, T.Kanamori, K.Kawanishi and Y.Katsuyama “Effective measurement of refractive index sensitivity of LPG for biological solution monitoring” OECC 17th, pp.781-782, Busan, Korea, Jul. 6, 2012.
- ④ Y.Katsuyama, S.Kasahara, Y.Tokunaga and **O.Koyama** “Long-Period Fiber Grating with Multi Resonant Wavelengths Fabricated by a CO₂ Laser for High Temperature Distributed Sensing” 電子情報通信学会技術研究報告(光ファイバ応用技術), OFT2012, No.1, pp.39-44, 岐阜県高山市, 5 月 24 日, 2012.
- ⑤ Y.Katsuyama, T.Kanamori, K.Kawanishi, T.Kusuda and **O.Koyama** “Web-based refractive index monitoring system for biological solution, employing LPG-FBG hybrid optical sensors” BCFIC 2nd, pp.CD1-8, Vilnius, Lithuania, Apr. 27, 2012.
- ⑥ Y.Katsuyama and **O.Koyama** “Long-period fiber grating with multi resonant wavelengths fabricated by a CO₂ laser for distributed sensing” ICP 2nd, pp.6-10, Kota Kinabalu, Malaysia, Oct. 17, 2011.
- ⑦ **O.Koyama**, Y.Tokunaga, S.Kasahara, M.Yamada and Y.Katsuyama “Carving a fiber by a CO₂ laser to shift resonant wavelength of LPFG for distributed sensors” OECC 16th, pp.204-205, Kaohsiung, Taiwan, Jul. 6, 2011.

- ⑧ Y.Katsuyama, Y.Tokunaga, S.Kasahara, R.Sougen, **O.Koyama** and M.Yamada
“Multi long-period gratings in a fiber carved and written by a CO₂ laser for distributed sensing” OFS-21, pp.77539I-1-77539I-4, Ottawa, Canada, May 19, 2011.

6. 研究組織

(1)研究代表者

小山 長規 (Koyama Osanori)

大阪府立大学・工学研究科・助教

研究者番号：10336802