

令和元年6月18日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06292

研究課題名(和文) 空孔径が乗分布のフォトニック結晶ファイバを用いたファイバコリメータの開発

研究課題名(英文) Development of fiber collimator using photonics crystal fiber with alpha-power air hole diameter distribution

研究代表者

横田 浩久 (Yokota, Hirohisa)

茨城大学・理工学研究科(工学野)・准教授

研究者番号：30272115

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：光ファイバ断面の中心近傍に周期的に空孔を配置したフォトニック結晶ファイバ(PCF)に光源から効率よく光を入射する方法として、PCFの先端に空孔径がファイバ断面の半径方向に乗分布となっているPCF(GI-PCF)を接続したGI-PCFコリメータを提案した。PCFへの高い光結合効率を得られるGI-PCFの構造を明らかにし、GI-PCFの設計・試作を行った。GI-PCFが間隙を伴うPCF同士の接続損失低減にも有効であることも明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光源からフォトニック結晶ファイバ(PCF)へ高い効率で光を入射する方法に用いる新しいPCFの構造(GI-PCF)を提案し、その有効性を理論的に示した。良好な特性が得られ、作製が容易なGI-PCFの構造を明らかにし、その構造のGI-PCFの試作を行った。現在、PCFは白色光発生や光波長変換などの様々な機能を実現するために用いられており、本研究で提案されたGI-PCFは機能性PCFの効率的な利用に貢献するものである。

研究成果の概要(英文)：A photonic crystal fiber (PCF) has periodically arranged air holes in its cross section. As a method for light coupling from a light source to the PCF, we proposed a GI-PCF collimator in which a GI-PCF with alpha-power air hole diameter distribution in radial direction is spliced to the PCF. GI-PCF structures to obtain high optical coupling efficiency to the PCF were clarified, and a prototype of GI-PCF was designed and fabricated. It was also clarified that a GI-PCF was effective for loss reduction in PCF splicing with gap.

研究分野：光エレクトロニクス

キーワード：フォトニック結晶ファイバ ファイバコリメータ 乗分布

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ファイバ断面の中心近傍に複数の空孔を配置したフォトニック結晶ファイバ (Photonic Crystal Fiber: PCF) は、空孔の大きさや配列を適切に選ぶことにより、従来の光ファイバでは得られなかった様々な特性を実現できることから、近年注目されている。これまで、PCFはその興味深い特性から機能性ファイバへの応用が提案され、数多くの応用例が報告されている。最近では伝送損失の低い PCF が実現されており、光ファイバ通信システムの伝送路に PCF を用いることも試みられている。また、PCF は一般に純石英ガラスを材料として作製され、ドーパントを含まないことから、高温や放射線などの過酷環境下におけるセンシングへの応用も期待できる。

PCF を含めた光ファイバに端面から光を入射する方法としては、「光源からの光をレンズで端面に集光する」、「ファイバピグテール付き光源を用いてファイバ端面同士を突き合わせる」などの方法がある。通常の PCF は均一な直径の空孔が等間隔に配置されており、従来のステップ型光ファイバと同様の導波モードが伝搬する。機能性ファイバや情報伝送用ファイバとして用いられる PCF は一般に単一モードであり、上記の方法で光を入射する際にはモード不整合による結合損失が生じることが問題となっている。従来のステップ型光ファイバでは、先端に適切な長さのグレーデッドインデックス (GI) 型光ファイバを接続することでモード不整合による結合損失を抑制できることが知られており、ファイバコリメータとして製品化もされている。PCF は空孔径を変化させることでクラッドの等価屈折率分布を制御できることから、空孔径を半径方向に不均一とすることでグレーデッド型の等価屈折率分布を有するクラッドを実現でき、グレーデッド型ファイバと同様にコリメータとしての応用が期待できる。しかしながら、このような PCF コリメータに関する研究・開発は、我々が知る限りほとんど行われていないのが現状である。

このような状況の中で、研究代表者のグループは PCF および PCF デバイスの設計・作製に関する先駆的研究を行い、国内外から高い評価を得ている。これまで本研究に関連するものとして、炭酸ガスレーザ照射による空孔縮小した PCF 光減衰器の作製に関する研究を行い、炭酸ガスレーザ照射による空孔径縮小を用いた PCF と通常の単一モード光ファイバの接続損失低減について、理論的・実験的研究を行い、これらの有効性を実証してきた。

### 2. 研究の目的

本研究では、空孔ピッチ (空孔の中心間距離) を一定として空孔径を半径方向に  $\alpha$  乗分布とすることで等価屈折率を半径方向に徐々に変化させた PCR (Graded effective Index PCF: GI-PCF) の設計・試作を行い、ファイバ端面から光を入射する際の光結合効率向上に有効なファイバコリメータへの応用を行うことを目的としている。目的の詳細は以下の通りである。

#### (1) GI-PCF およびそれを用いたファイバコリメータの設計

GI-PCF の半径方向の空孔径分布を変化させて、ガウスビームおよび通常の PCF の導波モードを入射した際の光波伝搬特性を調べる。伝送パワーが最大となる空孔径分布を明らかにし、光源からの光入射ならびに間隙を有する場合の PCF 接続に適した GI-PCF の設計を行う。結合効率は 80% 以上を目標とする。合わせて、コリメータを構成した際の GI-PCF 長誤差への許容度や波長特性に優れた構造も明らかにする。

#### (2) GI-PCF の試作

(1) の結果をもとに GI-PCF の試作を行う。様々な波長の光源からレンズもしくは通常の PCF を介して GI-PCF に光を入射し、GI-PCF への光結合効率を調べる。空孔径が均一な通常の PCF (Step effective Index PCF: SI-PCF) に接続してコリメータを構成し、その有効性を確かめる。

#### (3) 通常の PCF 端面における GI 構造形成

通常の PCF 端面において空孔径を縮小して空孔径を半径方向に  $\alpha$  乗分布とした構造を考え、ガウスビームを入射した際に高い光結合効率を得られる構造を明らかにする。炭酸ガスレーザ光を通常の PCF の端面に照射して空孔径分布の制御を行う。加工した端面から光を入射し、端面加工の効果を確認する。

### 3. 研究の方法

本研究では、空孔ピッチを一定として空孔径を半径方向に変化させた GI-PCF およびそれを用いたファイバコリメータの開発を行った。理論面では、GI-PCF の設計およびそれを用いたファイバコリメータの特性解析を行った。GI-PCF の空孔クラッドを等価な屈折率をもつ媒質で置き換えた等価モデルに対して、相互方向陰的差分ビーム伝搬法 (ADI-BPM) を用いた光波伝搬解析を行うことで、GI-PCF 中を伝搬する光のビーム径変動や導波パワーなどを求めた。実験面では、設計した GI-PCF の作製を研究協力者である (有) 飛田理化硝子製作所の協力のもとに行った。炭酸ガスレーザを PCF 端面に照射することで、PCF 端面における空孔径を半径方向に変化させることを試みた。

### 4. 研究成果

#### (1) GI-PCF のファイバコリメータへの応用

図 1 に本研究で考えた PCF の断面構造を示す。図 1(a) は空孔ピッチと空孔径が一般的な通常の PCF であり、空孔層数は 6 としている。ステップ型の等価屈折率分布を有するため、以降 Step-like

effective Index PCF: SI-PCF と表記する 図 1(b)は GI-PCF の断面図であり 空孔ピッチが一様で、第 4 層までの空孔径は半径方向に  $\alpha$  乗分布となっている。第 5, 6 層の空孔は閉じ込め損失を抑制するために設けられており、直径は第 4 層の空孔径と等しくしている。この GI-PCF を SI-PCF に接続し、コリメータとして用いる。GI-PCF の空孔ピッチは SI-PCF のそれと一致させており、接続の際には空孔の位置が一致するように端面を付き合わせる。

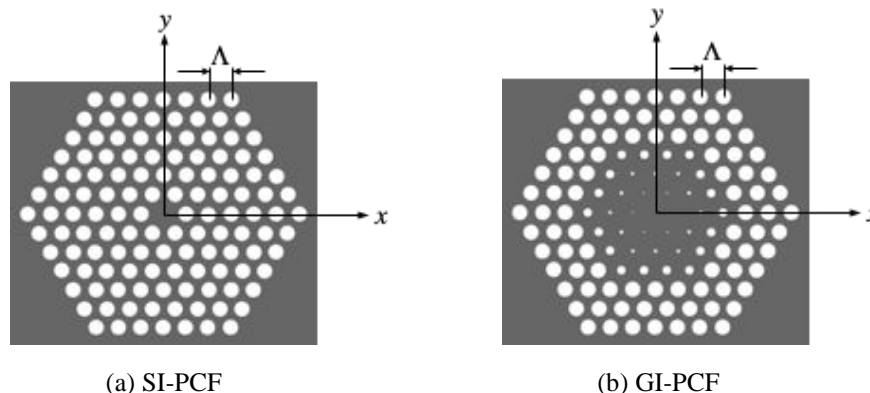


図 1 本研究で考えた PCF の断面図

はじめに、端面からガウスビームを入射した PCF 中の光波伝搬特性を調べた。入射ガウスビームの直径  $30\mu\text{m}$ 、波長  $1550\text{nm}$  としている。空孔ピッチは  $6.25\mu\text{m}$  であり、SI-PCF の空孔径は  $2.71\mu\text{m}$  とした。GI-PCF の空孔径は 2 乗分布とし、第 4~6 層の空孔径は SI-PCF の空孔径と等しくなるようにしている。PCF 断面内の強度ピークと導波パワーの伝搬距離に沿った変化を図 2 に示す。SI-PCF では、強度ピークの振動が伝搬するにつれて収束し、導波パワーが減衰している。一方、GI-PCF では、伝搬に沿った強度ピーク振動の収束は見られず、導波パワーがほとんど減衰しないことが分かる。GI-PCF は多モード動作するため、ガウスビームが入射すると複数の導波モードが励起されてモード間干渉が生じ、伝搬に沿って強度ピークが振動する。複数の導波モード励起により放射モードへの変換が抑制されることから、導波パワーの減衰が抑制される。

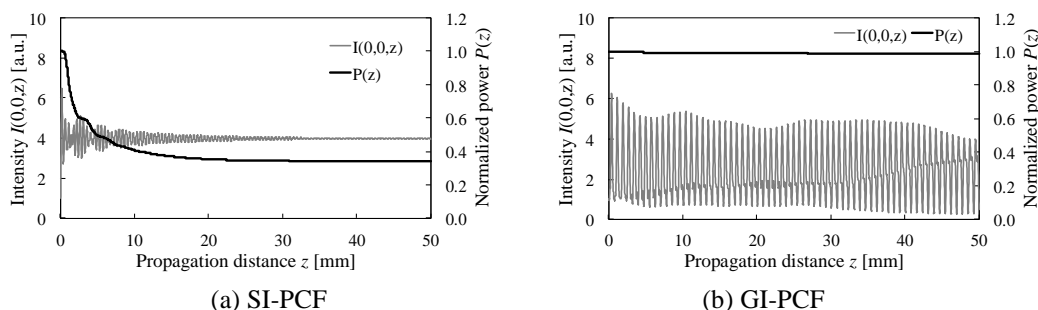


図 2 強度ピークと導波パワーの伝搬距離に沿った変化

ガウスビームを入射した GI-PCF 中では強度ピークが周期的に変化するが、このことはビーム径が周期的に変動することを意味する。ビーム径が最小となる長さ (= ビーム径変動周期の  $n/2$  倍,  $n$ : 奇数) の GI-PCF を SI-PCF に接続したコリメータを構成し、GI-PCF 端面からガウスビームを入射することで、光源から SI-PCF への高い結合効率が期待できる (図 3)。GI-PCF の長さを適切に選ぶことで、直径  $30\mu\text{m}$ 、波長  $1550\text{nm}$  のガウスビームの SI-PCF への光結合効率を  $-4.6\text{dB}$  から  $-0.42\text{dB}$  に向上できることが理論的に示された。

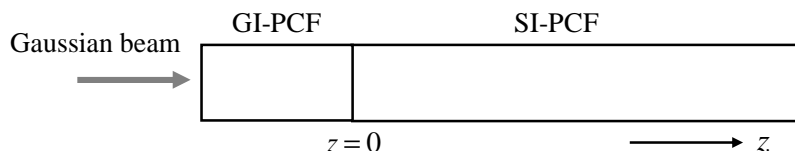


図 3 SI-PCF 用 GI-PCF コリメータ

GI-PCF コリメータを構成する際、光結合効率が高く、GI-PCF 長の誤差に対する許容度が高いことが望ましい。通常の GI 型多モードファイバ (GI-MMF) を用いたコリメータとの比較も合わせて、ファイバ長誤差に対する光結合効率の変化を図 4 に示す。ここで、SI-PCF の空孔ピッチと空孔径はそれぞれ  $8\mu\text{m}$  および  $3.5\mu\text{m}$  としている。入射ガウスビームの直径と波長はそれ

それぞれ  $30\mu\text{m}$  および  $1550\text{nm}$  である。また、GI-PCF の空孔径は 2 乗分布としている。GI-PCF コリメータでは、空孔径を大きくすることで GI-MMF コリメータと同等の光結合効率が得られることが確かめられた。一方、ファイバ長誤差に対する許容度は空孔径が小さい方が優れており、2 乗分布の GI-PCF コリメータでは、光結合効率とファイバ長誤差に対する許容度はトレードオフの関係となっていることが分かった。

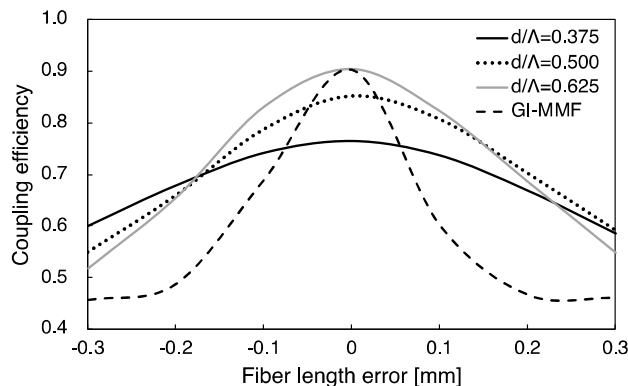


図 4 ファイバ長誤差に対する光結合効率の変化

GI-PCF は半径方向に空孔径が変化しているため、断面内で空孔径に差がある。PCF を線引きする際には圧力制御が必要であり、空孔径の差が小さい方が圧力制御は容易となることから、空孔径分布関数の  $\alpha$  は小さくすることが望ましい。様々な  $\alpha$  の GI-PCF コリメータにおいて空孔径に対する光結合効率の変化を調べた結果を図 5 に示す。空孔径を適切に選ぶことで、光結合効率を劣化させずに  $\alpha$  の値を  $1/2$  まで小さくできることが示された。また、 $\alpha=1/2$  とした場合には、光結合効率とファイバ長誤差に対する許容度のトレードオフも解消されることが分かった。

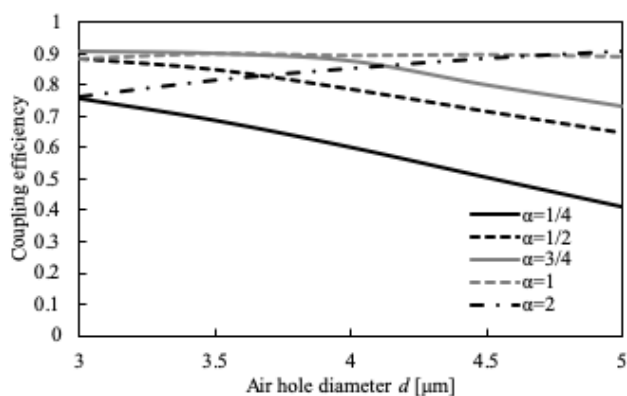


図 5 空孔径に対する光結合効率

上記の結果をもとに、GI-PCF の試作を行った。空孔ピッチ  $8\mu\text{m}$ 、第 4~6 層の空孔径  $3\mu\text{m}$  で第 1~4 層の空孔径が  $1/2$  乗分布とした。純石英コア材、各層を構成するキャピラリ、ジャケット材を作製し、一体化加工により母材を作製した後、線引き加工を行った。試作した GI-PCF 光学特性については、本研究期間中での測定が完了していないため、今後、測定を進めて GI-PCF 有効性を実験的に明らかにしていきたい。

## (2) 間隙を有する PCF 接続損失の低減

光ファイバを用いた可変遅延線では、間隙を有する光ファイバ接続が用いられる。本研究では、間隙を有する通常の SI-PCF 接続時の結合損失抑制に GI-PCF を用いることを検討した。解析モデルを図 6 に示す。動作波長  $1550\text{nm}$  とし、SI-PCF と GI-PCF の空孔ピッチを  $6.25\mu\text{m}$ 、SI-PCF の空孔径を  $2.71\mu\text{m}$  とした。GI-PCF の空孔径は 2 乗分布とし、第 4~6 層の空孔径は SI-PCF の空孔径と等しくなるようにしている。解析結果を図 7 に示す。GI-PCF を用いない場合、間隙が大きくなるほど結合損失が大きくなる (図 7(a))。図 7(b)は、間隙  $300\mu\text{m}$  として GI-PCF 長を変化させた際の伝搬方向に沿った導波パワー変化を示したものである。間隙長に対して適切な長さの GI-PCF を接続することで結合損失を抑制できることが示された。

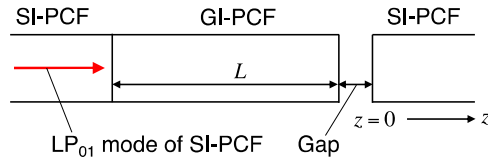


図 6 GI-PCF を用いた間隙を有する SI-PCF 接続時の結合損失抑制

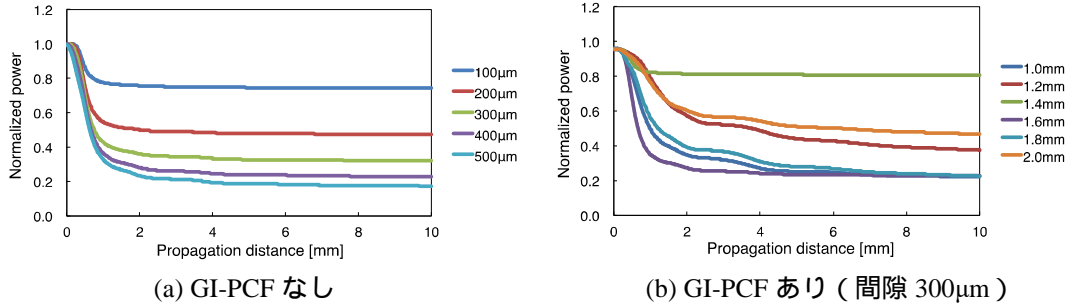


図 7 間隙を有する SI-PCF 接続における伝搬方向に沿った導波パワー変化

(3) 空孔テーパを形成した PCF の特性解析

PCF 端面近傍を加熱することで、PCF の空孔径が長手方向に端面へ向かって徐々に小さくなる空孔テーパ (図 8) の形成が期待できる。

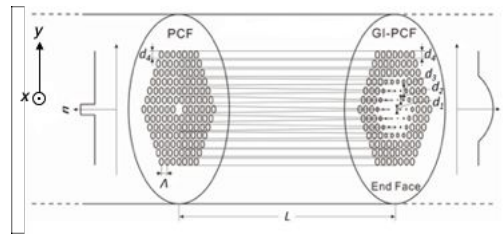


図 8 空孔テーパを形成した PCF

空孔ピッチ  $8\mu\text{m}$ 、空孔径  $3.5\mu\text{m}$  である PCF の端面において空孔径が 2 乗分布となる空孔テーパ (テーパ長  $0.8\text{mm}$ ) を形成し、空孔を縮小した端面から波長  $1550\text{nm}$ 、直径  $30\mu\text{m}$  のガウスビームを入射した際の伝搬方向に沿った導波パワーの変化を調べた。結果を図 9 に示す。空孔テーパ (GI 構造) を形成することで光結合効率を向上できることが示された。

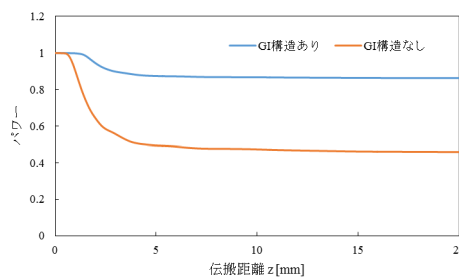


図 9 空孔テーパを形成した PCF での伝搬方向に沿った導波パワー変化

空孔を縮小していない側の端面から光を入射した場合についても解析を行った。空孔を縮小していない側の端面からガウスビームを入射した際の伝搬方向に沿った強度ピークの変化を調べた結果、GI 構造となっている端面に近づくにつれて周期的な強度ピーク変動が見られ、テーパ長を適切に選ぶことで、端面から出射されるビームが集光されることが分かった。その結果、空孔テーパ PCF を所望の焦点距離を有するファイバレンズとして応用できる可能性が示された。

炭酸ガスレーザー照射を用いた加熱・溶融により、PCF 端面に  $\alpha$  乗の空孔径分布 (GI 構造) を形成することを試みた。炭酸ガスレーザー光をセレン化亜鉛円形平面凸レンズにより PCF 端面に集光し、端面近傍を溶融した。空孔の縮小は見られたが、所望の空孔径分布の形成には至らなかった。今後はレーザー照射条件を詳細に検討し、GI 構造の形成を進めていきたい。

## 5 . 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計4件)

M. Wakabayashi, H. Yokota, Y. Imai, “Design of graded index type photonic crystal fiber having  $\alpha$ -power air hole diameter distribution with  $\alpha < 1$  for fiber collimator application,” Tech. Dig. 11th Int. Conf. Optics-photonics Design & Fabrication (ODF'18), 28PSa-23, 2018 査読有

K. Koizumi, H. Yokota, Y. Imai, “Propagation characteristics in PCF with tapered air holes for fiber connecting devices,” Tech. Dig. 11th Int. Conf. Optics-photonics Design & Fabrication (ODF'18), 28PSa-26, 2018 査読有

K. Higuchi, H. Yokota, K. Yoneya, Y. Imai, “Connection loss reduction in variable optical delay line by using graded-index type photonic crystal fiber,” IEEJ Trans. Electric. And Electron. Eng., 13, pp. 742-747, 2018 査読有 DOI:10.1002/tee.22624

H. Yokota, K. Higuchi, Y. Imai, “Light propagation characteristics in photonic crystal fibers with  $\alpha$ -power profiles of air hole diameter distributions and their application to fiber collimator,” Jpn. J. Appl. Phys., 55, 08RE10, 2016 査読有 <https://iopscience.iop.org/article/10.7567/JJAP.55.08RE10>

### 〔学会発表〕(計6件)

野口一希, 横田浩久, 今井洋, 「単一モードファイバ用コリメータに適したグレーデッドインデックスフォトニック結晶ファイバの設計」, 平成 30 年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2018.11.17, 日立シビックセンター (茨城県・日立市)

前田尚斗, 今井洋, 「GI-PCF を用いた PCF の接続損失の低減」, 平成 30 年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2018.11.17, 日立シビックセンター (茨城県・日立市)

若林美月, 横田浩久, 今井洋, 「ファイバコリメータ用 GI 型フォトニック結晶ファイバの設計」, 平成 29 年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2017.11.18, 日立シビックセンター (茨城県・日立市)

垣内進也, 横田浩久, 今井洋, 「空孔径制御によるフォトニック結晶ファイバへの光結合効率向上の検討」, 平成 29 年度電気学会東京支部茨城支所研究発表会, 2017.11.18, 日立シビックセンター (茨城県・日立市)

横田浩久, 若林美月, 樋口恵一, 今井洋, 「ファイバ長許容誤差に優れたコリメータ用 GI 型フォトニック結晶ファイバの設計」, 電子情報通信学会 光ファイバ応用技術研究会, OFT2016-37, 2017.1.20, 機械振興会館 (東京都・港区)

横田浩久, 樋口恵一, 今井洋, 「GI 型フォトニック結晶ファイバの伝搬特性に対する空孔径対ピッチ比の影響」, 電子情報通信学会 2016 年ソサイエティ大会, B-13-24, 2016.9.22, 北海道大学 (北海道・札幌市)

## 6 . 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：今井 洋

ローマ字氏名：Imai, Yoh

所属研究機関名：茨城大学

部局名：理工学研究科 (工学野)

職名：教授

研究者番号 (8 桁)：20151665

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：飛田 英夫

ローマ字氏名：Tobita, Hideo

研究協力者氏名：木植 秀之

ローマ字氏名：Kiue, Hideyuki

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。