

令和 4 年 5 月 3 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12833

研究課題名(和文)内視鏡組み込み用の破断しない生体適応型赤外光中空ファイバ

研究課題名(英文)Non-breakable bioadaptive infrared hollow fiber for endoscope surgery

研究代表者

高久 裕之(Takaku, Hiroyuki)

仙台高等専門学校・総合工学科・研究員

研究者番号：20705016

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：レーザー内視鏡治療は現実のものに進展し、高度化が期待されている。キー技術は、体内に挿入しても決して破壊しない、安全・安心なレーザー伝送路の開発である。

本研究では、内視鏡の可動範囲、半径1.5 mmの曲げに適應でき、疲労限界内では決して破壊しない赤外光伝送路として、「無毒」、「耐腐食性」、「生体適合性」、「再利用可能」の特長を有する、内径530 μmのニッケルチタンパイプを母材とする中空ファイバを開発することを目的とした。優れた切開能力を有するEr:YAGレーザー光、止血能力のあるCO2レーザー光、照射部を視認するためのLD光を伝送可能な光学膜内装銀中空Ni-Tiファイバの製作に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

Minimal invasive medicine (最小侵襲治療)が叫ばれている医療現場において、レーザーによる非観血的な治療は社会的な要求であり、それに関連する治療装置の開発は極めて社会的にもニーズが大きい。それと共に、高出力赤外レーザー光を安全かつフレキシブルに伝送する多機能性のある内視鏡用高信頼性・再利用性・高機能太径中空Ni-Tiファイバを実現することは、大きな意味を持つ。

研究成果の概要(英文)：Non-breakable infrared optical fiber is required for laser endoscopic surgery.

In this study, Our group has tried to make hollow fiber based on nickel titanium pipe with an inner diameter of 530 μm as an infrared optical fiber that is "non-toxic", "corrosion resistant", "biocompatible", adaptable to the movable range of the endoscope.

We have succeeded make a optical polymer coated silver hollow Ni-Ti fiber that can transmit Er: YAG laser light with excellent incision ability, CO2 laser light with hemostatic ability, and LD light for visually recognizing the irradiated part.

研究分野：光伝送工学

キーワード：中空ファイバ 赤外レーザー光 先端機能デバイス レーザ治療

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

1. 研究開始当初の背景

本研究の着想に至った経緯を下記に示す。

予備実験を行い、下記の ~ について見出した。

液相法により、内面平滑化膜を内装した中空ニッケルチタン (Ni-Ti)ファイバの製作 (内径530 μm 、長さ17 cm)が可能なこと。

中空Ni-Tiファイバは、曲げ角270°、曲げ半径15 mmに曲げても、曲がり癖が非常に小さく、柔軟に取り扱えること。

ある種のシリコンアクリル樹脂膜を用いることで、中空Ni-Tiファイバの内装膜の付着力が改善されること。

市販のNi-Tiチューブ(内径533 μm)を研磨することで内面粗さを低減できること。

Er:YAGレーザー光は文献で予想されているよりはるかに長い、数mm水中伝送できること。

シリジポンプを用いることで中空ファイバ内装膜の厚さ変動を改善できること。

これにより、現在、注目を浴びているレーザーによる大腸ポリープ除去、更には優れた「再利用性」、「生体適合性」、「無侵襲」の内視鏡用伝送システムの実現見通しが得られるものと期待される。

2. 研究の目的

内視鏡による低侵襲レーザー治療を念頭に、曲げ半径15 mm程度、曲げ角270度を安全に、そして安定して実現し、治療用のCO₂レーザー光とEr:YAGレーザー光の複合赤外レーザー光と視認用の緑色LDレーザー光を同時に伝送可能とする内視鏡用光伝送路を開発することにある。その学術的独自性と創造性は以下の通りである。

極めて曲げやすく、しかも極めて強固なNi-Tiパイプに着目したのは本研究以外にはない。Ti-Niパイプの特長として、超弾性合金と形状記憶合金の2つの特長を有しているため、内視鏡に必要とされている復元力の要求に最適である。

Ti-Niパイプは無毒、耐腐食性、生体適合性、など内視鏡用の赤外レーザー光伝送媒体に適しているが、これに着目した研究は世界初である。

可視光~CO₂レーザー光を低損失に伝送できる、光学膜内装銀中空ファイバを用いることから、CO₂レーザー光とEr:YAGレーザー光と緑色LDレーザー光の同時伝送が可能であり、高効率・高機能性医療機器の実現に対して大きな貢献を果たしうる。

内径533 μm の高信頼性・再利用性・高機能太径中空Ni-Tiファイバを実現できれば、軽量で普通鋼なみの強度により、内視鏡の可撓性を大きく制限することがなく、曲げても破断しない安全性と、優れた生体適合性と耐食性により、赤外伝送路の再利用化による経済性のメリットが生じると予想される。

Minimal invasive medicine (最小侵襲治療)が叫ばれている医療現場において、レーザーによる非観血的な治療は社会的な要求であり、それに関連する治療装置の開発は極めて社会的にもニーズが大きい。それと共に、高出力赤外レーザー光を安全かつフレキシブルに伝送する多機能性のある内視鏡用高信頼性・再利用性・高機能太径中空Ni-Tiファイバを実現することは、大きな意味を持つ。

3. 研究の方法

研究方法を下記に示す。

(1) 内面平滑化膜内装太径銀中空Ni-Tiファイバ先端素子の製作と評価

Ni-Tiチューブの内面粗さを抑制するために、研磨剤を用いた物理研磨を行う。目標値は内面粗さ0.9 μm 程度である。その後、内面に平滑化ポリマー膜を形成し、更なる内面粗さの低減を図り、銀鏡反応で銀膜を成膜する。太径銀中空Ni-Tiファイバ先端素子(内径533 μm 、長さ20~30 cm)の製作を行い、評価を行う。具体的な手段、方法およびその内容は下記のとおりである。

内面平滑化用ポリマーの選択

Ni-Tiパイプと銀膜との付着力、耐久性の観点からポリマー溶液を選択する。

内面平滑化用ポリマー膜の成膜技術の開発

簡易な液相法を用いた内面平滑化用ポリマー膜の成膜技術を確立する。

平滑化膜内装太径銀中空Ni-Tiファイバ先端素子の評価

可視~近赤外波長損失特性の測定、表面粗さの測定を行う。

(2) 赤外レーザー複合光伝送用高信頼性・再利用性・高機能太径中空Ni-Tiファイバの製作

効率のよい切開が可能なEr:YAGレーザー光と止血効果を有するCO₂レーザー光を同時伝送可能な高信頼性・再利用性・高機能太径中空Ni-Tiファイバの製作を行う。高反射用光学膜として環状オレフィンポリマー(COP)を用い、膜厚を数十nmオーダーで精密に制御し、最適膜厚の成膜を行う。

(3) 赤外レーザー複合光伝送用高信頼性・高機能細径中空Ni-Tiファイバの評価

Er:YAGレーザー光、CO₂レーザー光ならびに可視パイロット光の伝送特性、曲げ損失特性の測定を行い、実用化の基礎資料を得る。

4. 研究成果

Ni-Ti チューブの内面粗さは、約 $0.5 \mu\text{m}$ と低減してきているがまだ散乱損失は大きく、可視波長帯の伝送効率は低い。そこで銀膜を成膜する前に、内面粗さの低減を図った。銀中空 Ni-Ti ファイバを製作する上で、内面平滑化膜の作用を持つポリマーを最初に、Ni-Ti チューブ (Ni-Ti) に内装し、その後に銀鏡反応によって銀膜 (Ag) を、成膜する必要がある。この際、Ni-Ti チューブと内面平滑化膜としてのポリマー、ポリマー上に成膜される銀膜の接着性が重要な課題となる。低損失な銀中空 Ni-Ti ファイバを実現出来れば、その次に、従来より採用されていた送液法によって低損失化用のポリマー (COP) を所定の厚さを持って成膜することで、 CO_2 レーザ光と可視パイロット光を低損失に伝送可能な中空 Ni-Ti ファイバを実現できる。内面平滑化膜として、アクリルシリコン樹脂を主成分とした 2 液反応型塗料を用いた。このアクリルシリコン樹脂は、金属板へ銀メッキする際の下地材であり、金属膜との付着力に優れたポリマーであり、また重ね塗りが可能である。アクリルシリコン樹脂の形成は送液法により行った。内径 $533 \mu\text{m}$ 、外径 $635 \mu\text{m}$ 、長さ 30 cm の Ni-Ti チューブにアクリルシリコン樹脂溶液 (濃度 $45.5 \text{ wt}\%$) を、送液速度 $4 \text{ cm}/\text{min}$ で送液し、その後、窒素ガスを流量 $50 \text{ ml}/\text{min}$ で流しながら、室温乾燥を 1 時間行った。内面平滑化膜の成膜後、銀鏡反応により銀膜の成膜を行った。銀鏡反応の前処理液として SnCl_2 処理を行い、溶液温度は 18°C 、銀鏡反応時間 3 分 15 秒で銀膜を成膜した。図 1 に、銀中空 Ni-Ti ファイバ (内径 $533 \mu\text{m}$ 、外径 $635 \mu\text{m}$ 、長さ 30 cm) の波長損失特性 (FWHM 10.6° のガウスビームで励振) を示す。

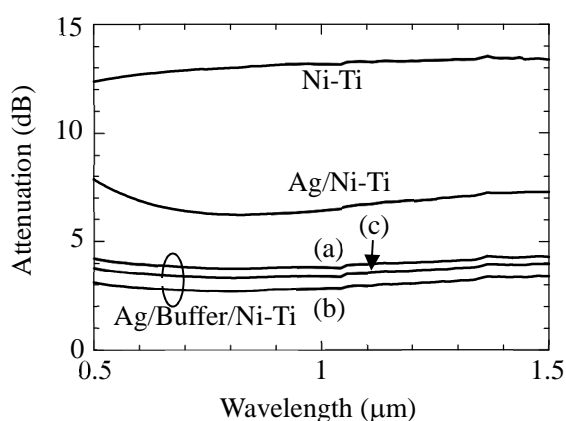


図 1 銀中空 Ni-Ti ファイバ (内径 $533 \mu\text{m}$ 、外径 $635 \mu\text{m}$ 、長さ 30 cm) の可視～近赤外波長損失特性
 図中の (a) は、内面平滑化膜を 2 回重ね塗り、(b) は 3 回重ね塗り、(c) は 4 回重ね塗りした。

Ni-Ti チューブに銀膜を成膜することで、低損失となり、更に、内面平滑化膜としてアクリルシリコン樹脂膜を成膜した銀中空 Ni-Ti ファイバは低損失となった。内装平滑化膜は 3 回重ね塗りをすることで、伝送特性は低損失化していくことが分る。5 回の重ね塗りを試みたが、膜の不均一性が増加し、伝送特性は劣化した。よって、アクリルシリコン樹脂膜の重ね塗り回数は 3 回が適当と結論される。

図 2 に、Ag/Buffer/Ni-Ti 中空ファイバの赤外損失スペクトルを示す。 CO_2 レーザ光の波長 $10.6 \mu\text{m}$ において、Ag/Buffer/Ni-Ti 中空ファイバは、Ag/Ni-Ti 中空ファイバの損失値より、低損失となった。

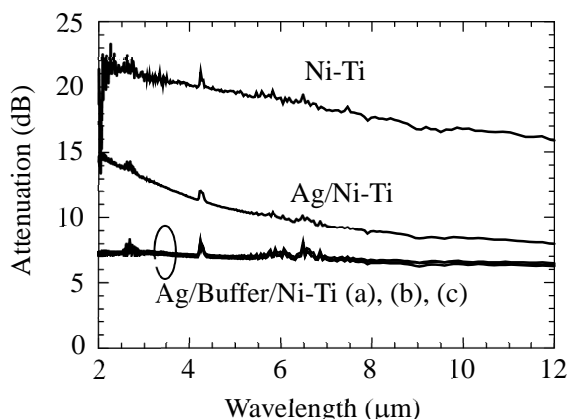


図 2 銀中空 Ni-Ti ファイバ (内径 $533 \mu\text{m}$ 、外径 $635 \mu\text{m}$ 、長さ 30 cm) の中赤外波長損失特性
 図中の (a) は、内面平滑化膜を 2 回重ね塗り、(b) は 3 回重ね塗り、(c) は 4 回重ね塗りした。

CO₂ レーザ光を低損失に伝送するために、光学膜として環状オレフィンポリマー (COP) を用いる。COP 膜厚を 0.95 μm 程度にすることで、CO₂ レーザ光と Er:YAG レーザ光と緑色 LD 光 (波長 532 nm) を低損失に伝送可能な中空 Ni-Ti ファイバが得られる。中空 Ni-Ti ファイバに、COP 膜を形成する方法は、シリンジポンプを用いて、濃度 13 wt% の COP 溶液を送液速度 8 cm/min で送液した後、室温で窒素ガスを流して乾燥を行い、形成している。

製作したアクリルシリコン樹脂平滑化膜つき COP 内装銀中空 Ni-Ti ファイバの可視～近赤外波長における損失波長特性を図 3 に示す。可視波長帯にある損失の谷は、波長 532 nm に近く、緑色 LD 光の伝送に適していると思われる。

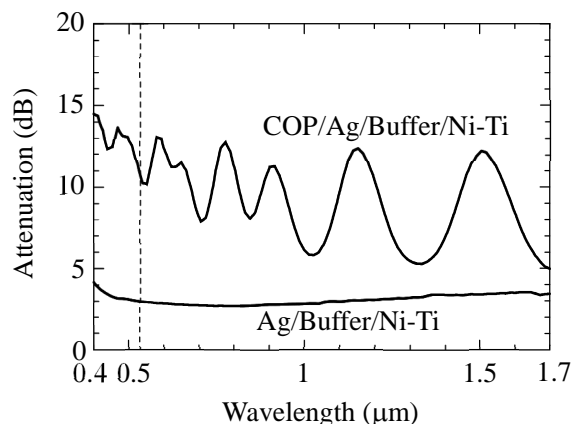


図 3 COP 膜内装銀中空 Ni-Ti ファイバ(内径 533 μm、外径 635 μm、長さ 30 cm)の可視～近赤外波長損失特性

製作したアクリルシリコン樹脂平滑化膜つき COP 内装銀中空 Ni-Ti ファイバの中赤外波長における損失波長特性を図 4 に示す。波長 4.5 μm 付近の損失の山は、光学膜の膜厚に依存しており、この損失ピークの位置から、実際に形成された膜厚を推定することができる。COP 内装銀中空 Ni-Ti ファイバの COP 膜厚は、0.98 μm であった。CO₂ レーザ光(波長 10.6 μm)と Er:YAG レーザ光 (波長 2.94 μm) の伝送に適した膜厚を成膜できたと思われる。

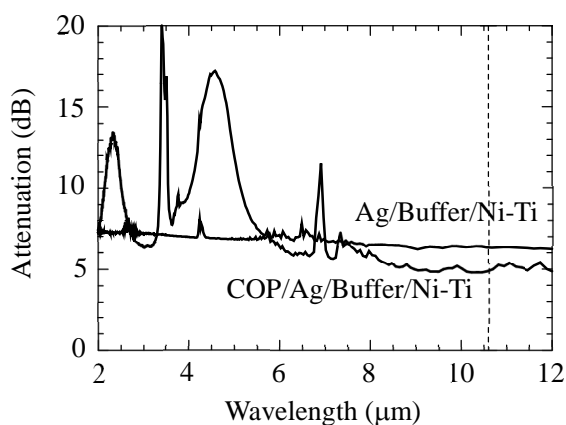


図 4 COP 膜内装銀中空 Ni-Ti ファイバ(内径 533 μm、外径 635 μm、長さ 30 cm)の中赤外波長損失特性

CO₂ レーザ光 (波長 10.6 μm、入射パワー 312 mW) と LD 光 (波長 532 nm、パワー 64 μW) を用い、アクリルシリコン樹脂平滑化膜つき COP 内装銀中空 Ni-Ti ファイバの伝送特性を評価した。焦点距離 50 mm の ZnSe レンズで集光したレーザ光を結合ファイバ (内径 530 μm、長さ 15 cm の銀中空ファイバ) を通して、内径 533 μm、長さ 30 cm の COP / Ag / Buffer / Ni-Ti 中空ファイバに入射した。中空ファイバの出力端を曲げ半径 1.5 cm で曲げ、伝送特性を評価した。測定結果を図 5 に示す。COP 内装銀中空 Ni-Ti ファイバの CO₂ レーザ光の伝送特性は、直線状態で 0.7 dB、出力端を 270° 曲げた状態で 2.3 dB であり、銀中空 Ni-Ti ファイバと比較して低損失であった。COP 内装銀中空 Ni-Ti ファイバの LD 光 (波長 532 nm) の伝送特性は、直線状態で 5.3 dB、270° 曲げた場合で 18 dB であり、銀中空 Ni-Ti ファイバの損失値と比較すると増加しているが、曲げ半径 1.5 cm で、270° 曲げた場合でも、照明の点いた部屋で十分に視認可能であった。

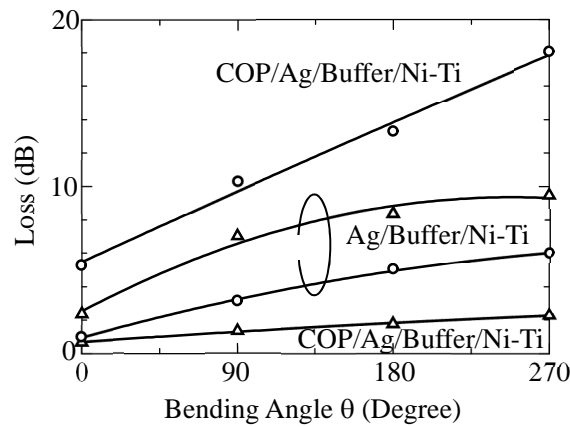


図5 COP膜内装銀中空Ni-Tiファイバ(内径533 μm、外径635 μm、長さ30 cm)の曲げ状態時のCO₂レーザー光とLD光(波長532 nm)の伝送損失特性
但し、曲げ半径Rは15 mm、図中の は、LD光(波長532 nm)の伝送損失、 は、CO₂レーザー光の伝送損失を示す。

Ni-Tiチューブに内面平滑化膜としてのアクリルシリコン樹脂膜を内装した後、高反射膜として、銀膜とCOP膜を形成し、COP内装銀中空Ni-Tiファイバを製作した。可視パイロット光を効率よく伝送できる内径533 μm、長さ30 cmのCO₂レーザー光伝送用中空Ni-Tiファイバを実現した。

Ni-Tiチューブの長尺化を図り、内径533 μm、外径635 μm、長さ90 cm、COP内装銀中空Ni-Tiファイバの製作を試みた。Ni-Tiチューブ内面の粗さを低減するために、内面平滑化膜として、シリコンアクリル樹脂を用いた。内面平滑化膜の成膜後、銀鏡反応により銀膜の成膜を行った。銀鏡反応の前処理液として、SnCl₂溶液を用い、溶液温度18 °C、銀鏡反応時間3分30秒で銀膜を成膜した。Er:YAGレーザー光(λ = 2.94 μm)を低損失に伝送するために、光学膜として、環状オレフィンポリマー(COP)を用いた。液相法を用い、濃度8 wt%のCOP溶液を送液速度4 cm/minで送液し、COP膜を成膜した。COP膜厚は、約0.22 μmであり、最適膜厚の約0.35 μmより薄い。Er:YAGレーザー光伝送用として適した膜厚を成膜できた。Er:YAGレーザー光を、焦点距離48 mmのCaF₂レンズで集光し、内径530 μm、長さ15 cmの結合ファイバを通して、中空Ni-Tiファイバ(内径533 μm、長さ90 cm)に入射した。中空Ni-Tiファイバの出射端を曲げ半径15 mmで曲げ、伝送特性を測定した。図6に結果を示す。COP内装銀中空Ni-Tiファイバは、直線状態で約6 dB、曲げ半径15 mmで曲げても折れず、180°曲げで約9 dBとなり、銀中空Ni-Tiファイバと比較すると大幅に伝送損失を低減することができた。

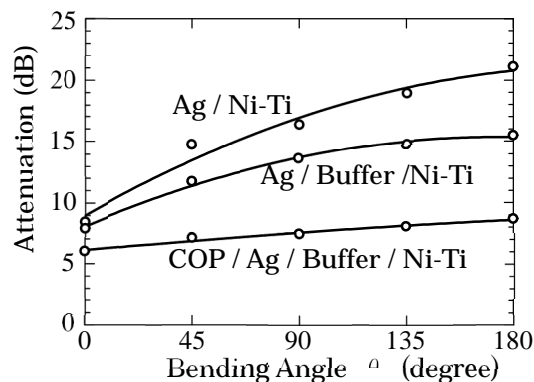


図6 COP膜内装銀中空Ni-Tiファイバ(内径533 μm、外径635 μm、長さ90 cm)の曲げ状態時のEr:YAGレーザー光(波長2.94 μm)伝送特性
但し、曲げ半径Rは15 mm

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 2件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Iwai Katsumasa, Takaku Hiroyuki, Miyagi Mitsunobu, Shi Yi-Wei, Zhu Xiao-Song, Matsuura Yuji	4. 巻 11635
2. 論文標題 Fabrication of 800- μ m-bore hollow optical fibers based on completely non-fragile and flexible Ni-Ti tube for the infrared	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2576477	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, X. S. Zhu, Y. Matsuura	4. 巻 11233
2. 論文標題 Transmission properties of dielectric-coated hollow optical fibers based on Ni-Ti tube	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SPIE	6. 最初と最後の頁 1-8
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2542148	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件／うち国際学会 2件）

1. 発表者名 K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, X. S. Zhu, Y. Matsuura
2. 発表標題 Fabrication of 800- μ m-bore hollow optical fibers based on completely non-fragile and flexible Ni-Ti tube for the infrared
3. 学会等名 Photonics West 2021（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井 完全, 高久 裕之, 宮城 光信
2. 発表標題 Er:YAGレーザー光伝送用COP内装銀中空Ni-Tiファイバの伝送特性
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩井 克全, 泉田 裕太郎, 高久 裕之, 宮城 光信
2. 発表標題 内径533 μm 銀中空Ni-Tiファイバの製作
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岩井 克全, 高久 裕之, 宮城 光信
2. 発表標題 内径320 μm 銀中空ファイバの製作法の改善
3. 学会等名 2020年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石井 駿, 高久 裕之, 岩井 克全, 宮城 光信
2. 発表標題 細径銀中空ステンレスファイバ先端素子の試作
3. 学会等名 平成31年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 高久 裕之, 岩井 克全, 宮城 光信
2. 発表標題 内径300 μm 銀中空ステンレスファイバ先端素子の製作 - 可視パイロット光伝送特性の改善 -
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩井 克全, 高久 裕之, 菅原 空哉, 宮城 光信
2. 発表標題 COP/Ag細径中空ファイバの送液法の改善
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第40回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, X. S. Zhu, Y. Matsuura
2. 発表標題 Transmission properties of dielectric-coated hollow optical fibers based on Ni-Ti tube
3. 学会等名 Photonics West 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	岩井 克全 (Iwai Katsumasa) (10361130)	仙台高等専門学校・総合工学科・准教授 (51303)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------