

令和 4 年 5 月 5 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：19K04542

研究課題名（和文）無侵襲内視鏡治療用超柔軟高機能細径赤外伝送路の開発

研究課題名（英文）Development of ultra-flexible, high-performance small-diameter infrared optical fiber for non-invasive endoscopic surgery

研究代表者

岩井 克全 (Iwai, Katsumasa)

仙台高等専門学校・総合工学科・准教授

研究者番号：10361130

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）：中空ファイバによる赤外レーザー光の安定伝送が可能になったことから、赤外レーザーは、電気メスでは不可能であった内視鏡治療にその応用が展開されようとしている。最近、極めて細径（内径320 μ m）中空ファイバの製作に見通しが立ってきたので、その実現の可能性は益々高まってきている。本研究では、

曲げ半径15 mm、曲げ角270°で使用可能とする細径中空ファイバの製作
高出力赤外レーザー光（Er:YAGとCO₂レーザー光）と可視ガイド光を伝送可能な中空ファイバの開発を目的とし、切開用のEr:YAGレーザー光と、止血用のCO₂レーザー光、ならびに可視ガイド光を伝送可能な内視鏡対応型細径中空ファイバの製作を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

細径中空ファイバを内視鏡治療に用いた場合、フレキシブルに扱え、小さい力で曲げることができ、内視鏡の可撓性を制限することがなくなる。Er:YAGレーザー光は、水の吸収が大きく、生体組織の切削性に優れ、効率よく治療でき、止血効果のあるCO₂レーザー光も伝送することでさまざまな治療に対応可能である。高反射膜として、目的レーザー波長帯の吸収が小さい材料を用いることから、可視光と赤外レーザー光の伝送が可能であり、高機能医療機器の実現に対し、大きな貢献を果たしうる。中空ファイバ製法は低コスト化が可能であり、使い捨て可能でもある。本研究の成果により、レーザー内視鏡手術はその適用範囲を格段に広げるものと思われる。

研究成果の概要（英文）：Since the hollow fiber enables stable transmission of infrared laser light, it is expected that infrared laser light will be applied to endoscopic surgery.

In this study, (1) fabrication of small diameter hollow fibers that can be used with a bending radius of 15 mm and a bending angle of 270°, (2) For the purpose of developing hollow fibers that transmit high-power infrared laser light (Er: YAG and CO₂ laser light) and visible guide light. We have fabricated a small diameter hollow fiber compatible with endoscopes surgery. The fabricated small-diameter hollow fiber can transmit Er:YAG laser light for incision, CO₂ laser light for hemostasis, and visible guide light.

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

内視鏡治療における赤外伝送路として中空ファイバが注目され、現在、高強度化と低損失化が図られている。しかしながら、次の理由で、困難さもあると言われている。

中空ファイバのガラス母材は、内面粗さが小さく、低損失なファイバを実現可能であるが、銀膜の成膜時に強度が劣化し、内径700 μm 銀中空ファイバは曲げ半径30 mm程度で破損する。

内径320 μm 以下の細径中空ファイバは、曲げ半径5 mm程度まで、フレキシブルに扱えるが、高反射膜の均一な成膜ができず、CO₂レーザー光の伝送は困難である。

ポリイミドチューブを母材にすることで、フレキシブルな太径中空ファイバを実現できるが、内面粗さが大きく、低損失化が困難である。

本研究では、中空ファイバの高強度化と低損失化を同時に図るため、次の着想に至った。

従来は、ガラス母材に無機保護膜を成膜し、銀鏡反応の際の水溶液による強度劣化を防いだが、ファイバ径を細径化することで中空ファイバ全体を大幅に高強度化する。

従来の内部保護膜成膜プロセスがなくなることで、保護膜の粗さによるファイバ全体の伝送損失の増加がなくなる。

細径中空ファイバに均一な高反射膜を実装することで、高強度かつ低損失な赤外伝送路を実現できる。

2. 研究の目的

本研究で提案する超柔軟高機能細径中空ファイバは、内部保護膜を内装することなく、内径320 μm の細径ガラス母材を採用することで、内視鏡治療で要求される可動性と複合レーザー光の低損失伝送を可能にする、従来にない、高効率かつ高機能な赤外伝送路である。

この研究は、電気メスでは決して実現できない、将来の新しい治療分野の展開に繋がるものと考えられる。細径中空ファイバを内視鏡治療に用いた場合、先端部は、非常にフレキシブルに扱え、小さい力で曲げることができ、内視鏡の可撓性を制限することがなくなる。またEr:YAGレーザー光(波長2.94 μm)を用いるため、水の吸収が大きく、生体組織の切削性に優れ、従来の治療器具より、短時間で効率よく治療でき、加えて、止血効果のあるCO₂レーザー光(波長10.6 μm)も伝送することでさまざまな治療に対応可能である。高反射膜として、目的レーザー波長帯の吸収が小さい環状オレフィンポリマー(COP)を用いることから、可視光と赤外レーザー光の同時伝送が可能であり、高機能医療機器の実現に対し、大きな貢献を果たしうる。中空ファイバ製法は単純で、しかも低コスト化が可能であり、使い捨て可能でもある。本研究の成果により、レーザー内視鏡手術はその適用範囲を格段に広げるものと思われる。

3. 研究の方法

研究方法を下記に示す。

(1) 超柔軟高機能細径銀中空ファイバの製作

低損失な中空ファイバを製作するための技術課題は、細径(内径320 μm)ガラス母材内面に、良好な銀膜を成膜することである。銀中空ファイバにピンホールが多いと、曲げた際に、伝送効率が低下する。現在、銀鏡反応の前処理として、銀膜の成膜速度を上げるためのSnCl₂溶液を用いたセンシング処理を行っている。SnCl₂溶液が均一にガラス母材の表面に付着すると、触媒効果で良好な銀膜が形成できる。しかしながら、実際は、不均一であり、ピンホール発生の原因となっている。そこで、SnCl₂溶液を均一にコートするために新しくコンディショニング処理(触媒の吸着改善)を導入する。予備実験で太径(内径700 μm)銀中空ファイバを製作したところ、曲げた際の可視ガイド光の伝送効率を改善することができた。本研究では、この実験成果を基に、細径銀中空ファイバの内面にできるピンホールの抑制を図る。

(2) 超柔軟高機能細径光学膜内装銀中空ファイバの製作

人体組織に強く吸収され、効率のよい切開が可能なEr:YAGレーザー光、止血効果を有するCO₂レーザー光、ならびに照射部位を示すLD光を同時伝送可能な超柔軟高機能細径中空ファイバの製作を行う。技術課題は、内径320 μm と細径でありながら、高反射膜として環状オレフィンポリマー(COP)を用い、膜厚を数10 nmオーダーで精密に制御し、適切な膜厚の成膜を図る。

(3) CO₂レーザー光とEr:YAGレーザー光伝送装置の構築と評価

CO₂レーザー装置とEr:YAGレーザー装置に超柔軟高機能細径中空ファイバを組み込み、超柔軟高機能細径中空ファイバの透過率や曲がりの影響などについて、実用化の基礎資料を得る。

4. 研究成果

内視鏡治療に中空ファイバを用いるには、半径15 mmの曲げに耐える大きな機械的強度を必要とされる。そこで、フレキシブルな内径320 μm ガラスキャピラリを母材とし、長尺な細径銀中空ファイバの製作を図った。図1に、銀鏡反応を用いた細径銀中空ファイバ(内径320 μm 、外径450 μm 、長さ2.4 m)の製作装置を示す。ファイバの内径が細いと銀鏡反応の際、溶液の流量が低下し、粗い銀膜が形成される。そこで、内径320 μm 、長さ2.4 mのガラスキャピラリ32本をバンドルにし、断面積を大きくすることで、流量の増加を試みた。バンドル1束(Method 1)のときの流量は約16 ml/minであり、バンドル2束を並列に接続する(Method 2, 図1参照)と、流量は約33 ml/minである。SnCl₂溶液の前処理を行い、銀鏡反応溶液の温度は18 $^{\circ}\text{C}$ 、銀鏡

反応時間は3分30秒で銀膜を成膜した。

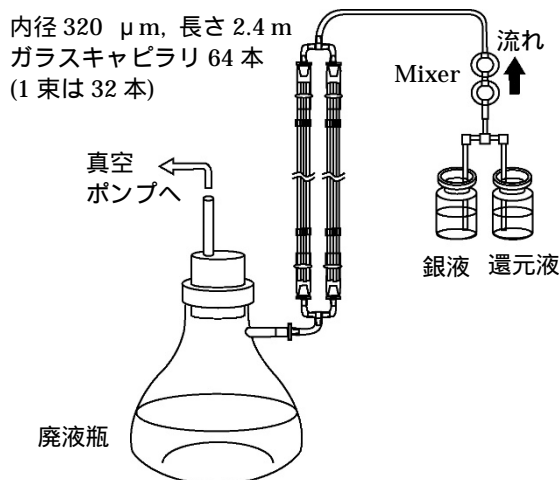


図1 細径銀中空ファイバの製作装置

図2に、Method 2を用いて製作した細径銀中空ファイバ(内径320 μm,長さ2.4 m)の1束の可視波長損失特性(FWHM10.6°のガウスビームで励振)を示す。伝送損失のばらつきは大きく、銀粒子のつまるファイバは8本あった。波長0.5 μmで、約10 dBとなるファイバは、11本あり、Method 1より、低損失な銀中空ファイバを多く製作することができた。波長0.5 μmにおける最小損失値は8.6 dBとなり、Method 1より、約1 dB低損失であった。もう一方の束も、伝送損失のばらつきは大きく、32本中1本がつかまって光が通らなかった。波長0.5 μmにおいて、伝送損失が約10 dBとなる銀中空ファイバは11本あり、最小損失値は約8.6 dBであった。

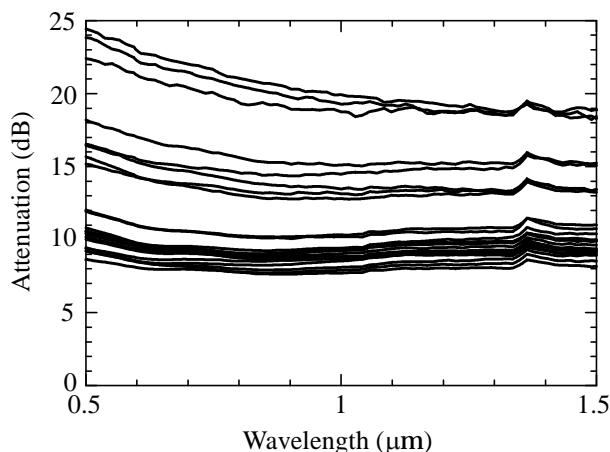


図2 細径銀中空ファイバ(320 μmφ×2.4 m, 24本)の波長損失特性 (Method 2、流量33 ml/min)

次に、細径中空ファイバのCO₂レーザー光伝送に適した光学ポリマー膜の成膜について検討した。これまで光学ポリマーとして、環状オレフィンポリマー(COP)のZEONEX-E48Rを用いてきた。CO₂レーザー光伝送に適した光学ポリマー膜厚は、約1.36 μmと厚く、成膜は困難であった。そこで、CO₂レーザー光の波長帯で透明であり、COPより低粘度なArton(JSR社製)を導入した。ガラスキャピラリを母材とした銀中空ファイバ(内径320 μm、長さ20 cm)を垂直に固定し、シリンジポンプを用いて光学ポリマー溶液を送液し、室温乾燥を行い成膜した。

図3に、Arton内装細径銀中空ファイバ(Arton/Ag、内径320 μm、長さ20 cm)の可視波長損失特性(FWHM10.6°のガウスビームで励振)を示す。約4.5 cm/minの送液速度で送液した。Arton/Ag中空ファイバも、明確な干渉ピークが見られ、均一なArton膜を成膜できることが分かった。

図4に光学ポリマー溶液の濃度に対する光学ポリマー膜厚を示す。COP溶液濃度14 wt%のとき、膜厚は、約0.67 μmであった。COP溶液濃度を14 wt%より高くすると、均一なCOP膜の成膜は困難であった。Arton溶液は、濃度20 wt%のとき、膜厚は、約1.08 μmであり、この膜厚はCO₂レーザー光(発振波長10.6 μm)の伝送に適している。

次に、内径320 μm中空ファイバの長尺化を図った。

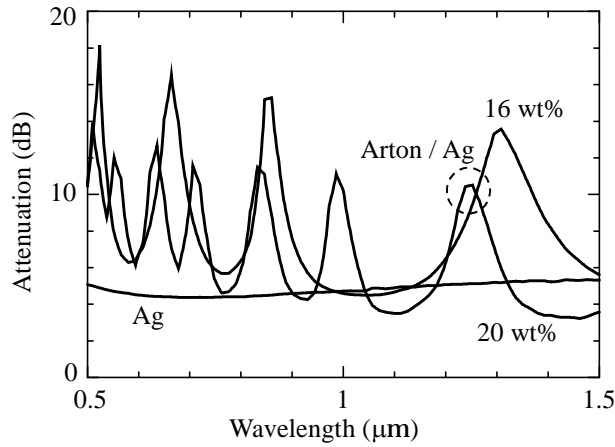


図3 Arton 内装細径銀中空ファイバ (320 $\mu\text{m}\phi \times 20 \text{ cm}$)の波長損失特性

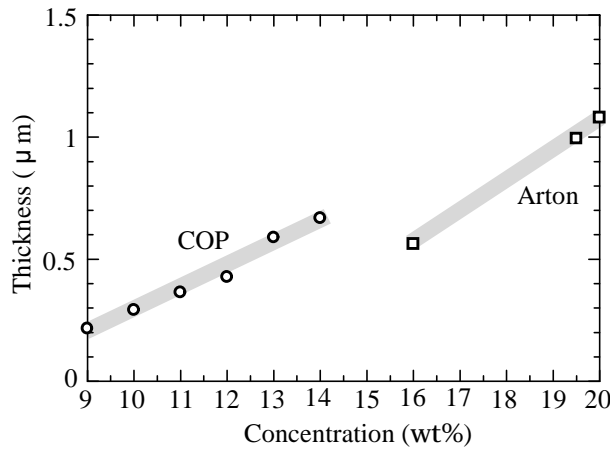


図4 光学ポリマー溶液の濃度に対する光学ポリマー膜厚 (○はCOP、□はAtron)

マイクロシリンジポンプを用いた場合、シリンジの容量限界が生じ、途中で送液が止まってしまふ。そこで、マイクロチューブポンプを用いた。Arton 膜の均一成膜を行うためには、Arton 溶液の送液速度を一定にすることが必要である。従来のマイクロチューブポンプを用いた送液系では、Arton 溶液に対して一方から力を加えていた。これを双方向から力を加えれば、より安定した速度で送液可能と思われる。そこで、送液系をダミーチューブでループさせ、Arton 溶液を上・下部から力を加える手法を導入した。ダミーチューブでループをすることにより、送液ポンプの吸引と送り出す力を、Arton 溶液へ同時に加えることができる。また、送液中、従来は外気を吸引していたが、提案手法では、蒸発した溶媒雰囲気中で送液をすることができるため、ポリマー膜の乾燥に対しても有効である。

マイクロチューブポンプを用いて、内径 320 μm 、長さ 2.3 m の銀中空ファイバに濃度 12 wt% の Arton 溶液を送液速度 9.2 cm/min で送液し、その後、窒素ガスを流量 50 ml/min で流しながら、室温乾燥を 60 min 行った。内径 320 μm 銀中空ファイバに、内径 0.79 mm の接続チューブを通して送液を行ったため、接続部で送液速度が変化し、均一成膜となっていない部分が生じた。そのため、ファイバ長 230 cm のうち、上・下部の 60 cm を切断した。図 5 に、内径 320 μm 、長さ 110 cm の Arton 膜内装銀中空ファイバ (Arton / Ag) の波長損失特性 (FWHM10.6° のガウスビームで励振) を示す。Arton 膜厚は、約 0.47 μm であった。

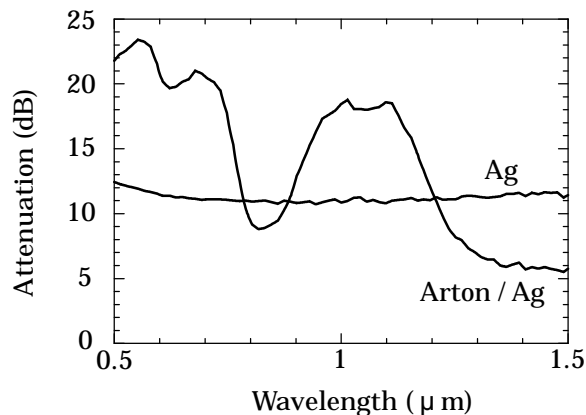


図5 細径 Arton 膜内装銀中空ファイバ(320 μm 、長さ 110 cm)の波長損失特性

図6に内径320 μm 、長さ100 cmの内壁に、Arton膜を1層のみ形成した時の HE_{11} モードの伝送損失を、光学膜厚の関数として示す。伝送する CO_2 レーザ光の波長は10.6 μm 、Er:YAGレーザ光の波長は2.94 μm 、可視ガイド光の波長は、650 nm、Arton膜の屈折率は、1.53としている。また銀の複素屈折率は、波長10.6 μm で、13.5-j75.3、波長2.94 μm で、1.256-j17.8、波長532 nmで、0.14-j4.13としている。今回成膜したArton膜厚は、約0.47 μm であり、図6に破線で示した。 CO_2 レーザ光とEr:YAGレーザ光とLD光（発振波長650 nm）を同時に伝送できる有効な光学膜厚であることが分った。

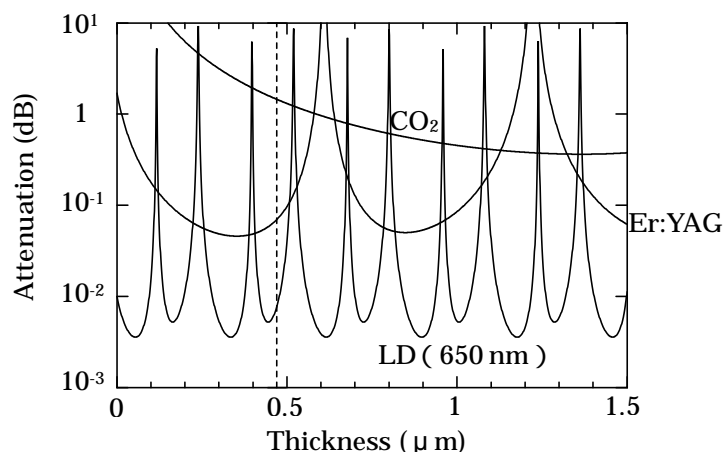


図6 Arton膜の膜厚に対する HE_{11} モードの伝送損失

CO_2 レーザ光（波長10.6 μm 、入射パワー346 mW）を用い、Arton内装銀中空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 CO_2 レーザ光を結合ファイバ（内径320 μm 、長さ15 cmのArton内装銀中空ファイバ）を通して、内径320 μm 、長さ110 cmのArton内装銀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15 mmで曲げ、伝送特性を評価した。測定結果を図7の で示す。また、Er:YAGレーザ光（波長2.94 μm ）とLD光（波長650 nm）を用い、伝送特性を測定した。LD光は、Er:YAGレーザ装置に付属の可視パイロット光を用いた。Er:YAGレーザとLDからの光を、焦点距離48 mmの CaF_2 レンズで集光し、内径320 μm 、長さ15 cmの結合ファイバを通して、細径中空ファイバ（内径320 μm 、長さ110 cm）に入射した。Er:YAGレーザ光の入射パワーは、約0.76 W、LD光の入射パワーは288 nWである。図7の は、Er:YAGレーザ光、 は、LD光の伝送損失である。

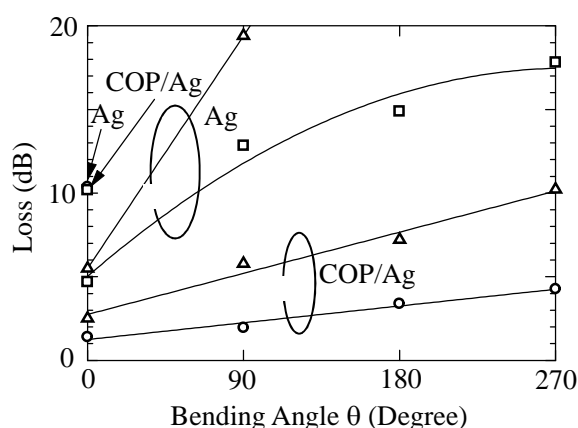


図7 Arton膜内装銀中空ファイバ(内径320 μm 、長さ110 cm)の曲げ状態時の各種レーザ光の伝送損失特性

但し、曲げ半径Rは15 mm、図中の は、Er:YAGレーザ光、 は、 CO_2 レーザ光、 は、LD光（波長650 nm）の伝送損失を示す。

COP内装銀中空ファイバの CO_2 レーザ光の伝送特性は、直線状態で2.5 dB、出力端を270°曲げた状態で約10.2 dBであり、銀中空ファイバと比較して低損失であった。COP内装銀中空ファイバのLD光（波長650 nm）の伝送特性は、直線状態で約10.1 dBであった。Er:YAGレーザ光の伝送特性は、直線状態で1.4 dB、出力端を270°曲げた状態で約4.3 dBであり、銀中空ファイバと比較して低損失であった。高反射膜として環状オレフィンポリマー(COP)のArtonを用いることで、伝送効率として、 CO_2 レーザ光の目標値40%以上に対して56%、Er:YAGレーザ光の目標値50%以上に対しては72%、可視パイロット光（波長650 nm）10%に対しては、約10%を実現した。

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 完全, 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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------