

令和 3 年 4 月 15 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04293

研究課題名（和文）内視鏡治療用無破断高機能レーザー光伝送装置の研究

研究課題名（英文）Research on high-performance laser light transmission device without breakage for endoscopic surgery

研究代表者

宮城 光信（Miyagi, Mitsunobu）

仙台高等専門学校・その他・名誉教授

研究者番号：90006263

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）：内視鏡治療では、曲げ半径15 mmに耐える伝送路が要求される。Er:YAGレーザー光と、CO₂レーザー光を伝送可能な破断のない、細径光学膜内装銀中空ステンレスファイバの実現を図った。内径300 μmのステンレスチューブに研磨剤を用いて内面研磨した後に、銀膜ならびに低損失化ポリマーとしてArton膜を成膜することにより、赤外光を伝送するための細径中空ステンレスファイバ先端素子（長さ20 cm）の製作に成功した。容易に曲げることができ、破断することがなく、CO₂レーザー光の波長10.6 μmにおいて低損失であり、Er:YAGレーザー光と緑色LD光も伝送可能な細径中空ステンレスファイバ先端素子を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

赤外レーザー光を用いる新しい手法である、大腸のポリープ除去治療では、大腸壁表面での水分による吸収が大きいため、大きなレーザーパワーが必要であり、また内視鏡治療のためには半径15 mm程度の曲げに耐える伝送路が要求される。

本研究では、体を全く傷をつけず、従来にない新規な「無侵襲」治療を実現するため、低出力でも優れた切開能力を有するEr:YAGレーザー光と、止血能力のある高出力CO₂レーザー光を同時伝送可能な光学膜内装銀中空ステンレスファイバの導入を提案し、細径（内径0.3 mm）で急峻に曲げることができ、しかも破断のない、従来にない無侵襲志向の内視鏡用高信頼性中空ステンレスファイバの実現を図った。

研究成果の概要（英文）：Endoscopic surgery requires a fiber that can withstand a bending radius of 15 mm. We have realized a optical polymer coated silver hollow stainless fiber with a small inner diameter that can transmit Er:YAG laser light and CO₂ laser light. After polishing the inner surface of a stainless steel tube having an inner diameter of 300 μm with an abrasive, a silver film was formed as a high reflection film. And an Arton polymer was formed as a high reflection polymer for infrared laser. We have realized a small-diameter hollow stainless fiber tip (Inner diameter 300 μm, Length 20 cm) that can be easily bent, does not break, has low loss at a wavelength of 10.6 μm of CO₂ laser light, and can also transmit Er:YAG laser light and green LD 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 (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、(1)液相法により、内面平滑化膜を内装した中空ステンレスファイバの製作(内径 0.55 mm, 長さ 1 m)が可能なこと、(2)ある種のシリコンアクリル樹脂膜を用いることで、中空ステンレスファイバの内装膜の付着力が改善されること、(3)市販のステンレスチューブ(内径 0.3 mm)の内面粗さが 0.9 μm まで低減してきたこと、(4)Er:YAG レーザ光は文献で予想されているよりはるかに長い、数 mm 程度水中伝送できること、(5)シリンジポンプを用いることで中空ステンレスファイバの内装膜の厚さ変動が改善されることを見出した。これにより、現在、注目を浴びているレーザによる大腸ポリープ除去、更には「最小侵襲」治療を越える、高度の「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。

国内外での関連する研究の中での当該研究の位置づけを下記に示す。

可視～赤外波長帯レーザ用で、フレキシブルに扱え、機械的に安定な伝送媒体が要求されており、この要求を満たすのは、中空ファイバのみであると認識されている。大腸のポリープ除去をレーザで行うという新しい試みが最近注目を浴びており、そのためには CO₂ レーザ光伝送の要求がある。中空ファイバを内視鏡治療で用いるためには、小さい力量で扱え、曲げても破断しないステンレスチューブを母材とした高信頼性中空ファイバの実現が求められている。本研究で提唱する中空ファイバ製作法は単純で低コスト化が可能である。現存する充実型赤外伝送路に対して、中空ファイバは機能、価格、取り扱い易さの上で極めて優位に立つ伝送媒体であることが認識されている。

2. 研究の目的

本研究では、以下の研究を行う。

(1) 内面平滑化した細径中空ステンレスファイバの製作

ステンレスチューブの表面粗さは、0.9 μm と大きく、銀膜と光学膜が不均一になるため、散乱損失により、伝送効率が低い。そこで銀膜を成膜する前に、ステンレスチューブの内面粗さの低減を図る。方法 1 として、内面粗さをカバーできる内装ポリマー膜を成膜する。内装ポリマーに要求される条件は、厚い膜を成膜できる、または重ね塗りができる、銀膜とステンレスチューブとの付着力が高い、用いる溶媒は光学膜を溶解しない、送液、乾燥によって、均一な膜を成膜できることである。方法 2 として、細径ステンレスファイバ内面を、粒径の細かい研磨剤で研磨して、表面粗さを低減する。

(2) 赤外レーザ複合光伝送用高信頼性・高機能細径中空ステンレスファイバの開発

血液により、CO₂ レーザ光は吸収されるため、ポリープの切除に高出力を要求されている。Er:YAG レーザ光は水中で 3 mm は伝送可能であり、低出力でも効率よく軟組織を切開できる。CO₂ レーザ光は止血能力があり、2つの赤外レーザ複合光により効率よいポリープの切除治療が可能になる。Er:YAG と CO₂ レーザ光を伝送可能な光学膜内装銀細径中空ステンレスファイバの開発を行う。内径 300 μm ステンレスファイバの長尺化を検討した結果、ステンレスチューブ母材の伝送損失は大きく、実用化に向かないため、先端チップ用としての製作を図った。

達成すべき数値レベルは以下の通りである。

(1) 高信頼性・高機能中空ステンレスファイバは、曲げ角 270 度、曲げ半径 15 mm で使用可能とする。

(2) 中空ステンレスファイバの内径は 0.3 mm とし、先端チップ用として長さ 0.2 m 程度とする。

3. 研究の方法

研究方法を下記に示す。

(1) 内面平滑化膜内装細径銀中空ステンレスファイバ先端素子の製作と評価

ステンレスチューブの内面粗さによるファイバの伝送損失を抑制する方法として、方法 1 は、内径 0.3 mm、長さ 20 cm のステンレスチューブに、内面平滑化膜材料として、新たに付着力に優れたシリコンアクリル樹脂膜を導入する。方法 2 では、粒径の細かい研磨剤を用いて、ステンレスチューブの内面研磨を行い、ファイバの伝送損失を低減する。細径銀中空ステンレスファイバ先端素子の製作を行い、評価を行う。

(2) 赤外レーザ複合光伝送用高信頼性・高機能細径中空ステンレスファイバの製作

Er:YAG レーザ光と CO₂ レーザ光を伝送可能な高信頼性・高機能細径中空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) 赤外レーザ複合光伝送用高信頼性・高機能細径中空ステンレスファイバの評価

Er:YAG レーザ光、CO₂ レーザ光ならびに可視パイロット光の伝送特性、曲げ損失特性、耐久試験を行い、実用化の基礎資料を得る。

4. 研究成果

ステンレスチューブの内面粗さは高く、散乱損失が大きい。そこで銀膜を成膜する前に、内面粗さの低減を図った。細径ステンレスチューブ研磨装置を用いて、ステンレスチューブ（内径 300 μm 、外径 450 μm ）に、ナイロン糸（太さ約 250 μm ）を通し、研磨剤を注入しながら、ステップモータを用いて、ナイロン糸を動かすことで内面研磨を行った。細径ステンレスチューブを保護するためにフッ素チューブに挿入し、端を接着剤で固定した後、固定器具に取り付け、曲げ半径約 36 cm で緩やかに湾曲させ、細径ステンレスチューブ内面にナイロン糸が触れるようにした。ステップモータを用いて、ナイロン糸を約 70 cm/min の速度で移動させた。モータの巻取り方向を約 10 分間隔で切り替えた。小型モータを用いて、細径ステンレスチューブを 2 分で 1 回転させることにより、チューブ内面が均等に研磨されるようにした。

研磨前の細径ステンレスチューブの長さは、30 cm である。粒子径 3 μm の研磨剤を用いて 12 時間研磨（Method 1）した後、フッ素チューブから細径ステンレスチューブを取り外す工程で、端の接着部を切断するため、長さは、28.3 cm となった。液体コンパウンド（粒子径 1 μm ）を用いて 10 時間研磨（Method 2）を行い、細径ステンレスチューブの長さは、25.9 cm となった。次に粒子径 0.3 μm の研磨剤を用いて 6 時間研磨（Method 3）した後、細径ステンレスチューブの長さは、23.6 cm となった。更に、粒子径 0.1 μm の研磨剤を用いて 6 時間研磨（Method 4）した後、細径ステンレスチューブの長さは、20.7 cm となった。図 1 に、細径ステンレスチューブ（内径 300 μm ）の可視波長損失特性（FWHM10.6° のガウスビームで励振）を示す。

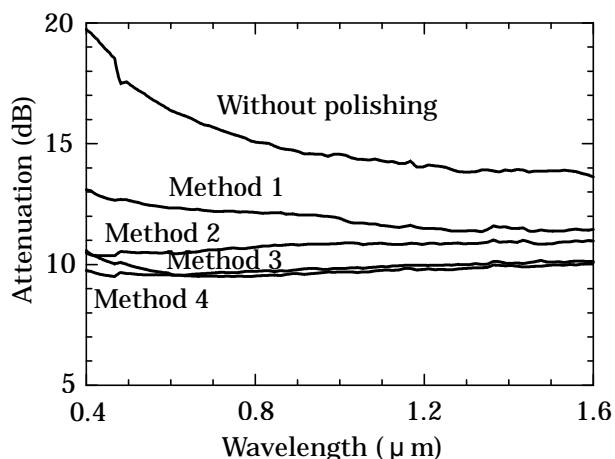


図 1 細径ステンレスチューブ(300 μm)の波長損失特性

波長 532 nm において、研磨前の細径ステンレスチューブの伝送損失は 17.1 dB であった。Method 1 で研磨した細径ステンレスチューブは、波長 532 nm において、伝送損失 12.5 dB となり、Method 2 で研磨すると、伝送損失は 10.5 dB に低下した。次に、Method 3 で研磨した細径ステンレスチューブは、波長 532 nm において、伝送損失 9.8 dB となり、更に Method 4 で研磨すると、伝送損失は 9.6 dB となり低下した。研磨前の細径ステンレスチューブと比較して、内面研磨工程を行うことにより、波長 1 μm から可視波長帯における低損失化ができた。

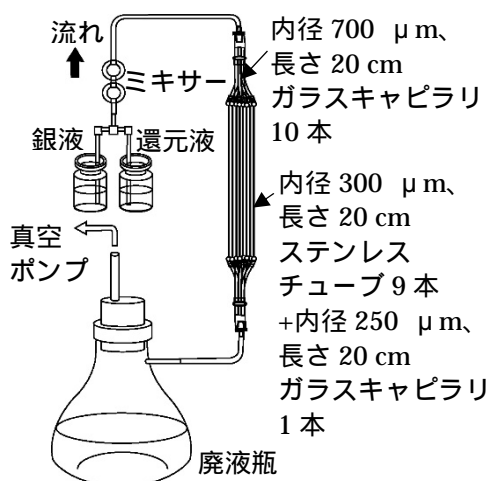


図 2 細径銀中空ステンレスファイバ先端素子の製作装置

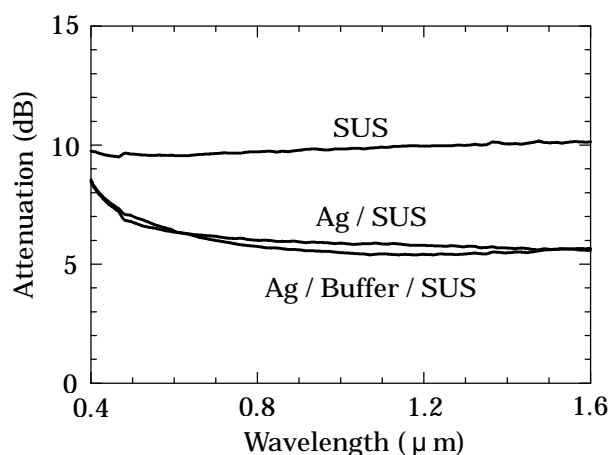


図 3 細径銀中空ステンレスファイバ先端素子(300 μm 、長さ 20 cm)の波長損失特性

図 2 に、銀鏡反応を用いた細径銀中空ステンレスファイバ先端素子の製作装置を示す。ファイバの内径が細いと銀鏡反応の際に流す溶液の流量が低下し、粗い銀膜が形成される。目標流量 10

ml/min以上を達成するため、内径 700 μm 、長さ 20 cm のガラスキャピラリチューブ 10 本を束にして、そこに細径ステンレスチューブ（内径 300 μm 、長さ 20 cm、9 本）とガラスキャピラリチューブ（内径 250 μm 、長さ 20 cm、1 本）を直列に接続し、断面積を大きくすることで、流量の増加を試みた。流量は約 33 ml/min であった。銀鏡反応の前処理として、コンディショナー（表面調整剤）溶液をステンレスチューブ内に流し、次に、 SnCl_2 溶液を流した。コンディショニング処理で、母材表面の SnCl_2 を Sn^{2+} の陽イオンにすることで触媒の吸着を高め、メッキムラを低減する効果がある。その後、水洗いを行い、銀鏡反応を行った。溶液温度 18 $^{\circ}\text{C}$ 、銀鏡反応時間は 3 分 30 秒で銀膜を成膜した。

図 3 に、細径銀中空ステンレスファイバ先端素子（Ag / SUS、内径 300 μm 、長さ 20 cm）の可視波長損失特性（FWHM10.6 $^{\circ}$ のガウスビームで励振）を示す。

比較として、細径ステンレスチューブ（SUS、内径 300 μm 、長さ 20 cm、Method 1~5 で内面研磨）と、細径ステンレスチューブを Method 1~5 で内面研磨後に、更に内面平滑化膜としてシリコンアクリル樹脂を成膜した細径銀中空ステンレスファイバ先端素子（Ag / Buffer / SUS、内径 300 μm 、長さ 20 cm）も示す。シリコンアクリル樹脂膜の成膜は送液法により行った。細径ステンレスチューブ（内径 300 μm 、長さ 20 cm）に、マイクロチューブポンプを用いて、送液速度約 13 cm/min で濃度 45.5 wt% のシリコンアクリル樹脂溶液を送液し、その後、窒素ガスを流量 50 ml/min で流しながら、室温乾燥を 30 min 行った。その後、銀鏡反応により、銀膜の形成を行った。細径銀中空ステンレスファイバ先端素子（Ag / SUS）は、波長 532 nm において、6.6 dB となり、研磨前の細径ステンレスチューブと比較して低損失化することができた。内面平滑化膜としてシリコンアクリル樹脂を成膜した細径銀中空ステンレスファイバ先端素子（Ag / Buffer / SUS）は、波長 532 nm において、6.8 dB となり、細径銀中空ステンレスファイバ先端素子（Ag / SUS）と同程度の伝送損失であることが分かった。

CO_2 レーザ光（ $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ）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の Arton（JSR 社製、屈折率 1.53）を用いた。マイクロシリンジポンプを用い、濃度 19.5 wt% の Arton 溶液を送液速度 4.3 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。

図 4 に、内径 300 μm 、長さ 20 cm の Arton 膜内装銀中空ステンレスファイバ（Arton / Ag / SUS）の波長損失特性（FWHM10.6 $^{\circ}$ のガウスビームで励振）を示す。Arton 膜厚は、約 1.04 μm であり、最適膜厚の約 1.36 μm より薄いのが、 CO_2 レーザ光伝送用として適した膜厚を成膜できた。

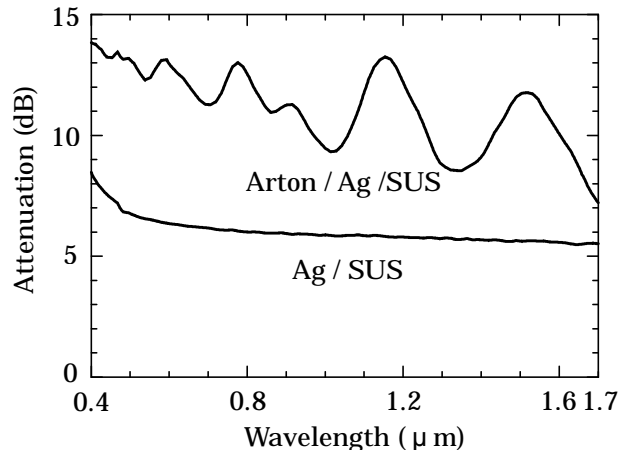


図 4 細径 Arton 膜内装銀中空ステンレスファイバ先端素子（300 μm 、長さ 20 cm）の波長損失特性

図 5 に内径 300 μm 、長さ 20 cm の内壁に、COP のアートン膜を 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 、緑色可視ガイド光の波長は、532 nm、COP のアートン膜の屈折率は、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、0.129-j3.19 としている。今回成膜したアートン膜厚は、約 1.04 μm であり、図 5 に破線で示した。 CO_2 レーザ光と Er:YAG レーザ光と緑色 LD（発振波長 532 nm）を同時に伝送できる有効な光学膜厚であることが分かった。

CO_2 レーザ光（ $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ ）を用い、細径中空ステンレスファイバの伝送特性を測定した。 CO_2 レーザからの光を、焦点距離 50 mm の ZnSe レンズで集光し、内径 300 μm 、長さ 20 cm の結合ファイバを通して、細径中空ステンレスファイバ先端素子（内径 300 μm 、長さ 20 cm）に入射した。 CO_2 レーザ光の入射パワーは、約 0.5 W である。細径中空ステンレスファイバ先端素子の出射端を曲げ半径 $R = 15 \text{ mm}$ で曲げ、伝送特性を測定した。

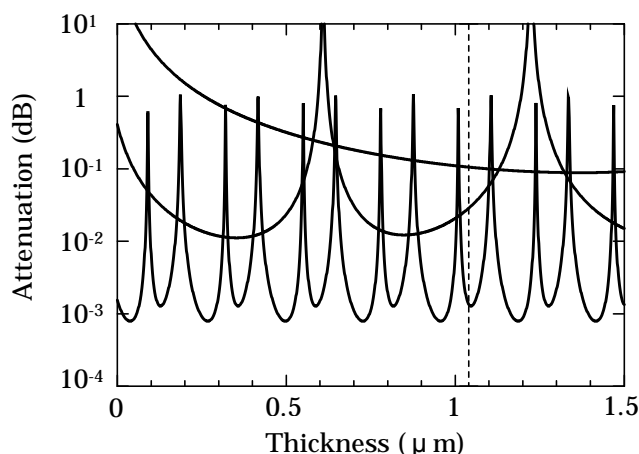


図5 内装光学膜(COPのアートン膜)の膜厚に対するHE₁₁モードの伝送損失

図6に結果を示す。細径 Arton 膜内装銀中空ステンレスファイバ先端素子は、直線状態で約 2.5 dB、曲げ半径 15 mm で曲げても折れず、180° 曲げで約 5.4 dB となり、Arton 膜を成膜することで、細径銀中空ステンレスファイバ先端素子と比較して、CO₂ レーザ光を低損失に伝送できることを確認した。

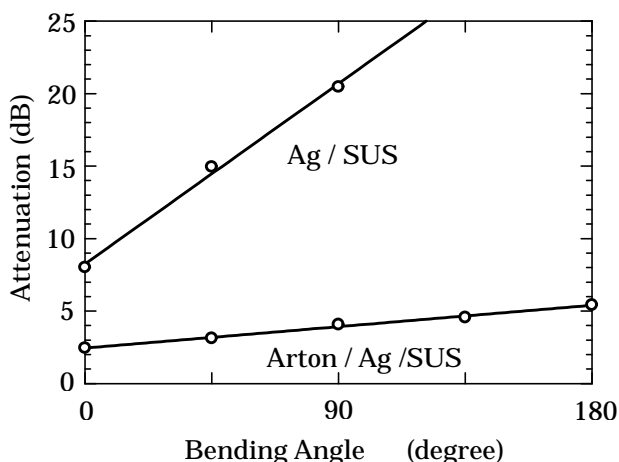


図6 細径 Arton 膜内装銀中空ステンレスファイバ先端素子 (300 μm、長さ 20 cm) の曲げ状態時の CO₂ レーザ光伝送損失特性

Er:YAG レーザ光 ($\lambda = 2.94 \mu\text{m}$) を用い、細径中空ステンレスファイバの伝送特性を測定した。Er:YAG レーザからの光を、焦点距離 48 mm の CaF₂ レンズで集光し、内径 250 μm、長さ 15 cm の結合銀中空ファイバを通して、細径中空ステンレスファイバ先端素子 (内径 300 μm、長さ 20 cm) に入射した。Er:YAG レーザ光の入射パワーは、約 0.5 W である。細径 Arton 膜内装銀中空ステンレスファイバ先端素子は、直線状態で約 4.3 dB、低損失化ポリマーの Arton 膜を成膜することで、細径銀中空ステンレスファイバ先端素子の約 6 dB と比較して、Er:YAG レーザ光を低損失に伝送できることを確認した。緑色 LD 光 ($\lambda = 532 \text{ nm}$) を用い、細径中空ステンレスファイバの伝送特性を測定した。緑色 LD からの光を、焦点距離 48 mm の CaF₂ レンズで集光し、内径 250 μm、長さ 15 cm の結合銀中空ファイバを通して、細径中空ステンレスファイバ先端素子 (内径 300 μm、長さ 20 cm) に入射した。細径 Arton 膜内装銀中空ステンレスファイバ先端素子は、直線状態で約 3.4 dB となった。細径中空ステンレスファイバ先端素子は、曲げ半径 15 mm で曲げると曲げ癖がつくことが分った。直線状態にして、再び CO₂ レーザ光の伝送測定を行ったところ、伝送損失の大きな増加は観察されなかった。

内径 300 μm のステンレスチューブに研磨剤を用いて内面研磨した後に、銀膜ならびに低損失化ポリマーとして Arton 膜を成膜することにより、赤外光を伝送するための細径中空ステンレスファイバ先端素子 (長さ 20 cm) の製作に成功した。容易に曲げることができ、破断することがなく、CO₂ レーザ光の波長 10.6 μm において低損失であり、Er:YAG レーザ光と緑色 LD 光も伝送可能な細径中空ステンレスファイバ先端素子を実現した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

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

1. 著者名 Iwai Katsumasa, Sasaki Yasuhiro, Takaku Hiroyuki, Miyagi Mitsunobu, Shi Yi-Wei, Zhu Xiao-Song, Matsuura Yuji	4. 巻 10872
2. 論文標題 Fabrication of 75- μ m-bore hollow optical fibers for infrared transmission	5. 発行年 2019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） 10.1117/12.2507432	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 Iwai Katsumasa, Takaku Hiroyuki, Miyagi Mitsunobu, Shi Yi-Wei, Matsuura Yuji	4. 巻 6
2. 論文標題 Fabrication of Shatter-Proof Metal Hollow-Core Optical Fibers for Endoscopic Mid-Infrared Laser Applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Fibers	6. 最初と最後の頁 24 ~ 24
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/fib6020024	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 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

1. 発表者名 K. Iwai, Y. Sasaki, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, X. S. Zhu, Y. Matsuura
2. 発表標題 Fabrication of 75- μm -bore hollow optical fibers for infrared transmission
3. 学会等名 Photonics West 2019, Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XIX (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岩井 克全, 高久裕之, 宮城 光信
2. 発表標題 Ni-Tiチューブを用いた銀中空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39回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤 駿, 岩井 克全, 高久 裕之, 宮城 光信
2. 発表標題 内径530 μm銀中空ステンレスファイバ先端素子の製作 - 内面平滑化膜成膜法の改善 -
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 2018年

1. 発表者名 岩井 克全, 高久 裕之, 宮城 光信
2. 発表標題 Ni - Tiチューブを母材とした光学膜内装銀中空ファイバの試作
3. 学会等名 平成30年度電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2018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
---------	---------