

平成 30 年 4 月 8 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06045

研究課題名(和文)無侵襲内視鏡治療用無破断レーザー光伝送装置の研究

研究課題名(英文)Study of non-breakable laser light transmission device for non-invasion endoscope treatment

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：赤外レーザー光を用いる新しい手法である、胃のポリープ除去治療では、胃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、また胃の上部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。しかし、現存の伝送路では対応できない。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、太径(内径0.55 mm)で破断のない、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を製作した。

研究成果の概要(英文)：Stainless pipe is used as the supporting tube for the infrared hollow fiber to obtain high durability and strong mechanical strength. In order to reduce roughness of inner surface of stainless tubes which causes the additional transmission loss, an acrylic-silicon resin material is used as a buffer layer to the inner walls of stainless tubes for a low-loss characteristic. For the dielectric inner-coating layer, cyclic olefin polymer (COP) is used to lower the transmission loss. The COP layer is formed by using liquid-phase coating method. The hollow fiber with optimized COP inner film thickness for CO2 laser light and Er:YAG laser light were fabricated.

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

## 1. 研究開始当初の背景

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、フレキシブルに扱うことができ、機械的に安定な伝送媒体が要求されており、この要求を満たすことの出来るものは、中空ファイバのみであると認識されている。

胃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、そのためには高吸収帯の水中で数 mm のオーダーでの CO<sub>2</sub> レーザ光を伝送するという要求がある。

赤外レーザ複合光伝送による無侵襲内視鏡治療を行うなど、可視光と赤外光を同軸・低損失に伝送可能なファイバが要求されている。

本研究で提唱する中空ファイバ製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。

中空ファイバを内視鏡治療で用いるためには、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・高機能中空ステンレスファイバの実現が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究では、以下の研究を行う。

内面平滑化用シリコンアクリル樹脂膜内装中空ステンレスファイバの開発

ステンレスチューブの表面粗さは、0.3～0.9 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、ステンレスパイプの内面粗さの低減を図る。内面粗さをカバーできる内装ポリマー膜に要求される条件は、(1)厚い膜を成膜できる、または重ね塗りができる、(2)銀膜とステンレスチューブとの付着力が高い、(3)用いる溶媒は光学膜を溶解しない、(4)送液、乾燥によって、均一な膜を成膜可能であることである。上記の条件を満たす内面平滑化用ポリマー膜として、予備実験で見出したシリコンアクリル内装膜を形成し、実際の要求を考慮し、曲げ半径 15 mm、曲げ角 270 度で使用可能な高信頼性中空ステンレスファイバ(内径 0.55 mm、長さ 1 m)を実現する。

赤外レーザ複合光伝送用中空ステンレスファイバの開発

体液や血液により、CO<sub>2</sub> 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 レーザ光は水中でも 3 mm 程度は伝送可能であり、低出力でも効率よく軟組織を切開できる。CO<sub>2</sub> レーザ光は止血能力があるので、2つのレーザ光の同時照射に

より効率よいポリープの切除治療が可能になる。Er:YAG レーザ光と CO<sub>2</sub> レーザ光を同時に伝送可能な光学膜内装銀中空ステンレスファイバの開発を行う。

赤外レーザ複合光伝送装置の構築と評価

中空ステンレスファイバを Er:YAG レーザ装置と CO<sub>2</sub> レーザ装置に実装し、機械特性、耐久特性など、無侵襲内視鏡治療システムとして実用面に関する特性を評価する。

## 3. 研究の方法

研究方法を下記に示す。

内面平滑化膜内装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ために、ステンレスチューブ内面に平滑化膜を形成し、その後、銀膜を成膜する手法は、内面平滑化膜に光学膜材料の環状オレフィンポリマー(COP)樹脂を用いており、付着力に課題があった。そこで、内径 0.55 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し、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。

内容は下記のとおりである。

- (1)内面平滑化用最適シリコンアクリル樹脂溶液の選択
- (2)内面平滑化用シリコンアクリル樹脂膜のコーティング技術の開発
- (3)高信頼性シリコンアクリル樹脂平滑化膜内装中空ステンレスファイバ先端素子の評価

内面平滑化膜内装銀中空ステンレスファイバの製作と評価

シリコンアクリル樹脂膜(内面平滑化用)内装中空ステンレスファイバの長尺化を図る。内容は下記のとおりである。

- (1)内面平滑化用シリコンアクリル樹脂膜のコーティング技術の開発
- (2)高信頼性シリコンアクリル樹脂平滑化膜内装中空ステンレスファイバの評価

赤外レーザ複合光伝送用中空ステンレスファイバの設計と製作

人体組織に強く吸収され、効率のよい切開が可能 Er:YAG レーザ光と軟組織の止血効果を有する CO<sub>2</sub> レーザ光を同時伝送可能な高強度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。内容は下記のとおりである。

- (1)光学膜コーティング技術の開発
- (2)赤外レーザ複合光伝送用中空ステンレスファイバの評価

Er:YAG レーザ光、CO<sub>2</sub> 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。

中空ファイバは内径が細くなると伝送損失が増加する。内径 0.53 mm のステンレスチ

チューブと内径 0.55 mm ステンレスチューブの外径は同じであり、低損失な内径 0.55 mm 銀中空ステンレスファイバを使用する。従来の銀中空ファイバと比較し、透過率や曲がりの影響などについて詳細な評価を行う。

#### 4. 研究成果

図 1 に、銀中空ステンレスファイバの構造を示す。市販されているステンレスチューブの内面粗さは、 $0.3\sim 0.9\ \mu\text{m}$  と低減してきているが、まだ散乱損失は大きく、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る。

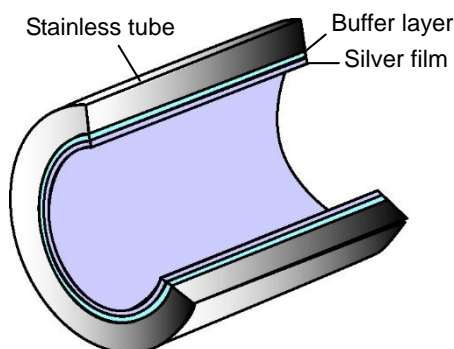


図 1 Ag/Buffer/SUS 中空ファイバ

内面平滑化膜の作用を持つポリマーを最初に、ステンレスチューブ (SUS) に内装し、その後銀鏡反応によって銀膜 (Ag) を成膜する必要がある。この際、ステンレス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。

内面粗さをカバーできる内装平滑化膜に要求される条件としては、

- 厚い膜を成膜できる、または重ね塗りができること、
- ステンレスチューブと銀膜との付着力が強いこと、
- 送液、乾燥によって一様な膜を成膜可能であること、

が必要である。上記の条件を満たす内面平滑化用ポリマー膜材料を種々検討した結果、シリコンアクリル樹脂が一つの候補であることが分った。このシリコンアクリル樹脂は、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る。

シリコンアクリル樹脂膜の形成は送液法により行う。まず、内径  $700\ \mu\text{m}$  銀中空ファイバに送液速度  $4\ \text{cm}/\text{min}$  でシリコンアクリル樹脂溶液の送液を行った。

図 2 に、シリコンアクリル樹脂膜のシリコンアクリル樹脂溶液濃度に対する膜厚特性を示す。約  $45.5\ \text{wt}\%$  の溶液を用いれば、1 回の成膜で約  $0.5\ \mu\text{m}$  の膜厚を成膜できる。

内径  $550\ \mu\text{m}$ 、外径  $780\ \mu\text{m}$ 、長さ  $20\ \text{cm}$  のステンレスチューブに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  $50\ \text{ml}/\text{min}$  で流しながら、室温乾燥を  $60$  分間行

った。送液速度は、約  $8\ \text{cm}/\text{min}$  である。そ

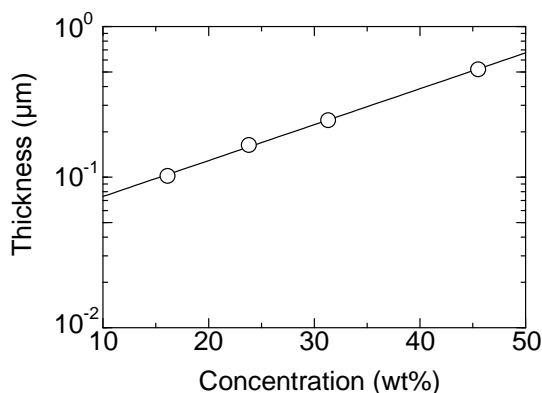


図 2 シリコンアクリル樹脂溶液濃度に対する膜厚特性

の後、 $\text{SnCl}_2$  溶液による前処理を用いた銀鏡反応により銀膜形成を行った。図 3 に、銀中空ステンレス短尺ファイバ (内径  $550\ \mu\text{m}$ 、外径  $780\ \mu\text{m}$ 、長さ  $20\ \text{cm}$ ) の波長損失特性 (FWHM $10.6^\circ$  のガウスビームで励振) を示す。

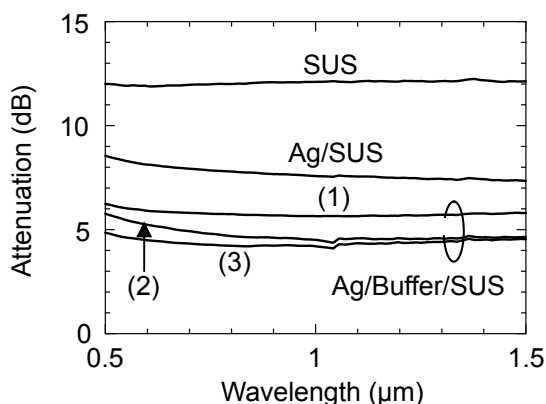


図 3 銀中空ステンレス短尺ファイバ (内径  $550\ \mu\text{m}$ 、外径  $780\ \mu\text{m}$ 、長さ  $20\ \text{cm}$ ) の波長損失特性  
但し、図中の (1) は、1 回成膜、(2) は、3 回成膜、(3) は 4 回成膜を示す。

これによれば、内装平滑化膜を 4 回重ね塗りすることで、伝送特性は低損失化していくことが分る。5 回の重ね塗りも試みたが、膜の不均一性が増加し、Ag 膜を一様に成膜することが困難であり、特性は劣化した。内面平滑化膜としてのシリコンアクリル樹脂の重ね塗り回数は 4 回が適当と結論される。

AFM (Atomic Force Microscope) により、製作した Ag/Buffer/SUS 中空ファイバの銀膜の表面を観察した。AFM で測定した微小面積での平面凹凸の平均値からのずれの二乗平均値を内面粗さとすれば、ステンレスチューブの内面粗さの  $0.3\sim 0.9\ \mu\text{m}$  から、本手法で  $88\sim 142\ \text{nm}$  と  $1/2\sim 1/10$  程度減少した。

シリコンアクリル樹脂膜 (内装平滑化用) 内装中空ステンレスファイバの長尺化を行う。図 4 に 2 本の Ag/Buffer/SUS 中空ファ

ファイバの可視波長域における損失波長特性を示す。Ag膜の成膜は安定に行われ、製作されたAg/Buffer/SUS中空ファイバの損失値は、Ag/SUS中空ファイバより低損失になることが分った。

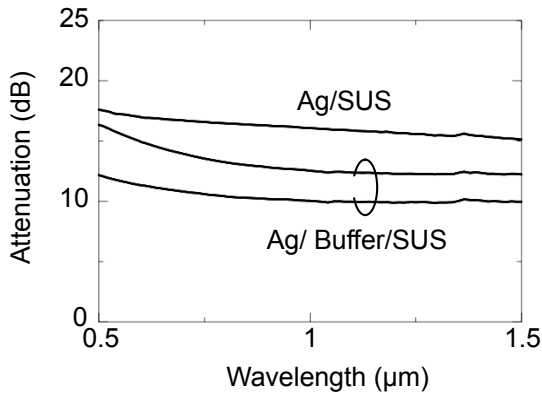


図4 銀中空ステンレスファイバ (内径 550 μm、外径 780 μm、長さ 100 cm) の波長損失特性

可視パイロットビームの発振波長 650 nm の損失は、最大 6 dB 程度低減している。

図5にAg/Buffer/SUS中空ファイバの赤外損失スペクトルを示す。CO<sub>2</sub> レーザの波長 10.6 μm では、Ag/SUS の損失値と同程度になることが分った。Er:YAG レーザの波長 2.94 μm で損失は明らかに小さくなっている。

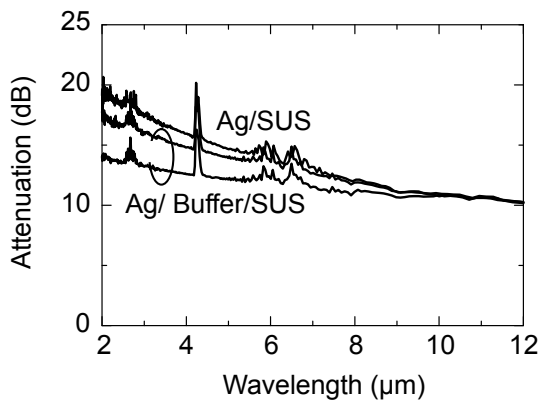


図5 銀中空ステンレス短尺ファイバ (内径 550 μm、外径 780 μm、長さ 100 cm) の波長損失特性

次に、波長 2.94 μm の Er:YAG レーザと波長 650 nm のレーザーダイオード (LD) を用い、銀中空ステンレスファイバの伝送特性を評価した。測定系を図6に示す。内径 530 μm、長さ 15 cm の銀中空ファイバを結合ファイバとし、Er:YAG レーザと LD からの光を内径 550 μm、外径 780 μm、長さ 1 m の銀中空ステンレスファイバに入射する。銀中空ステンレスファイバの出力端を曲げ半径 20.25 cm で曲げ、損失評価を行った。測定結果を図7に示す。Er:YAG レーザ光の伝送損失は、Ag/Buffer/SUS 中空ファイバの場合、直線状態で約 6 dB、180 度曲げた状態で、14 dB 程

度であり、Ag/SUS 中空ファイバの損失値が、直線で 9 dB、180 度曲げで 23 dB であることを比較すると大きく低減している。これは、ステンレスチューブの内面粗さを大幅に低減することができたためである。

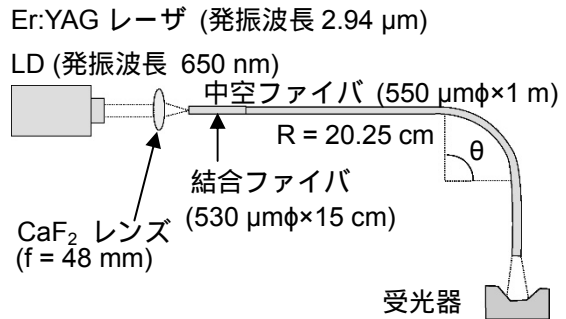


図6 Er:YAG レーザ光と LD 光 (発振波長 650 nm) の伝送特性の測定系

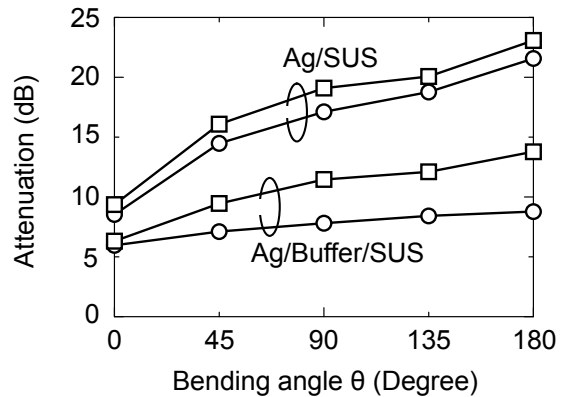


図7 Er:YAG レーザ光と LD 光 (発振波長 650 nm) の曲げ伝送特性 但し、曲げ半径 20.25 cm。

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<sub>2</sub> 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ステンレスファイバを実現できる。図8に、COP 膜内装銀中空ステンレスファイバを示す。

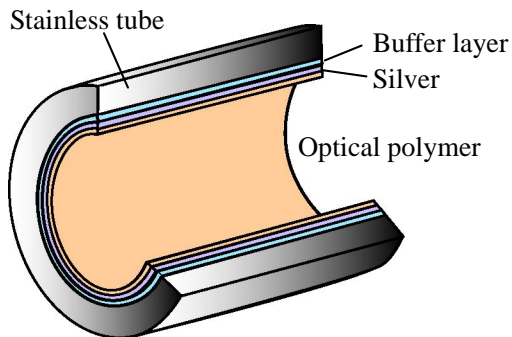


図8 COP/Ag/Buffer/SUS 中空ファイバ

CO<sub>2</sub> 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、CO<sub>2</sub> 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ステンレスファイバが得られる。シリンジポンプを用いて、濃度 12 wt% の COP 溶液を送液速度 9.2 cm/min で送液した後、室温で窒素ガス 25 ml/min を 2 時間流して乾燥を行った。

製作したシリコンアクリル樹脂平滑化膜つき COP 内装銀中空ステンレスファイバの損失波長特性を図 9 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。

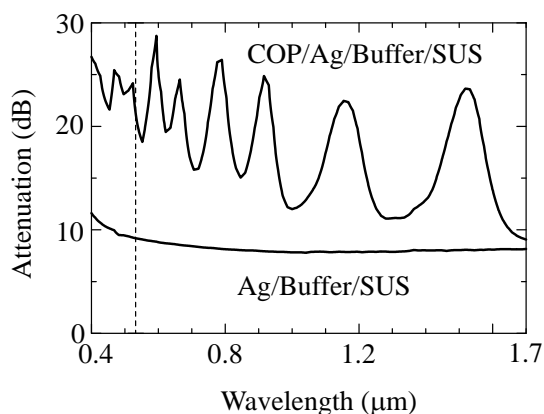


図 9 COP 内装銀中空ステンレスファイバ (内径 550 μm、外径 780 μm、長さ 100 cm) の波長損失特性

図 10 に、損失波長特性を示す。COP 膜厚は、0.97 μm であった。また、波長 2.94 μm 付近において、損失の谷が来ており、Er:YAG レーザ光と CO<sub>2</sub> レーザ光と緑色 LD 光の伝送に適した膜厚を成膜できた。

CO<sub>2</sub> レーザ光 (波長 10.6 μm) と LD 光 (波長 532 nm) を用い、COP 内装銀中空ステンレスファイバの伝送特性を評価した。測定系を図 11 に示す。焦点距離 50.8 mm の ZnSe レンズで集光し、結合ファイバ (内径 530 μm、長さ 15 cm) を通して、内径 550 μm、長さ 1 m の COP 内装銀中空ステンレスファイバに入射する。ファイバの出力端を曲げ半径 20.25 cm で曲げ、伝送特性を評価した。

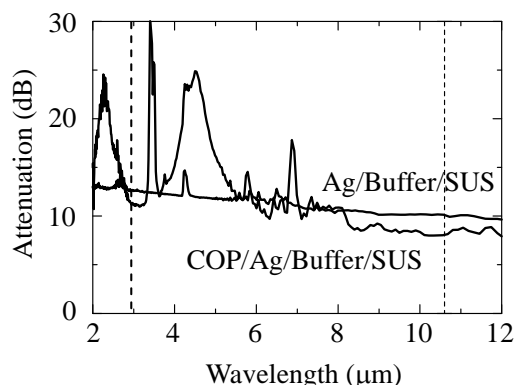


図 10 COP 内装銀中空ステンレスファイバ (内径 550 μm、外径 780 μm、長さ 100 cm) の波長損失特性

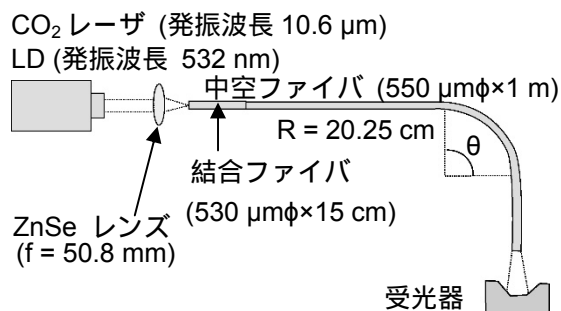


図 11 CO<sub>2</sub> レーザ光と LD 光 (発振波長 532 nm) の伝送特性の測定系

測定結果を図 12 に示す。COP 内装銀中空ステンレスファイバの CO<sub>2</sub> レーザ光の伝送特性は、直線状態で 0.8 dB、出力端を 180° 曲げた状態で 3.2 dB であり、銀中空ステンレスファイバと比較して低損失であった。COP 内装銀中空ステンレスファイバの LD 光 (発振波長 532 nm) の伝送特性は、直線状態で 11 dB、180° 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。

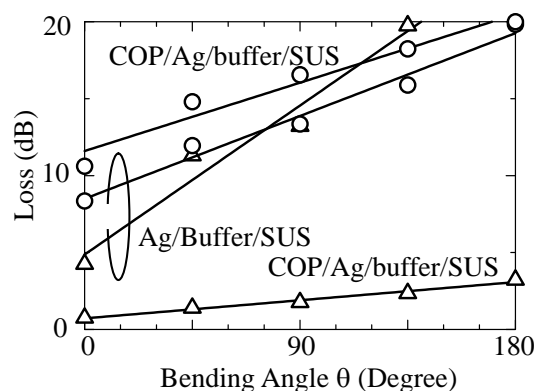


図 12 CO<sub>2</sub> レーザ光と LD 光 (発振波長 532 nm) の曲げ伝送特性  
但し、曲げ半径 20.25 cm。図中の は LD 光 (発振波長 532 nm)、 は CO<sub>2</sub> レーザ光の伝送特性を示す。

ステンレスチューブに内面平滑化膜としてのシリコンアクリル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 内装銀中空ステンレスファイバを製作した。内面粗さを大幅に低減した銀膜を形成することに成功し、可視パイロット光を効率よく伝送できる内径 550 μm、長さ 1 m の赤外レーザー光伝送 (CO<sub>2</sub> + Er:YAG) 用中空ステンレスファイバを実現した。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 5 件)

K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, X. S. Zhu, Y. Matsuura,

Transmission properties of dielectric-coated hollow optical fibers based on stainless tube, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 10488, 2018, pp. 1048804-1-1048804-8.

doi:10.1117/12.2286807

A. Seki, K. Iwai, T. Katagiri, and Y. Matsuura, Sensitivity improvement of optical fiber acoustic probe for all-optical photoacoustic imaging system, Applied Physics Express, 査読有, Vol. 10, 2017, pp. 072503-1-072503-4.

K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, Improvement of transmission properties of visible pilot beam for polymer-coated silver hollow fibers with acrylic silicone resin as buffer layer for sturdy structure, RIEC and IEEJ International Workshop on Biomedical Optics 2017, OQD-17-13, 査読有, Vol. 1, 2017, pp. 47-50.

K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, Improvement of transmission properties of visible pilot beam for polymer-coated silver hollow fibers with acrylic silicone resin as buffer layer for sturdy structure, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 10058, 2017, pp. 1-8.

DOI:10.1117/12.2249749

岩井 克全、高久 裕之、宮城 光信、石 芸尉、ステンレスチューブを母材とする銀中空ファイバの可視光伝送特性の改善、レーザー研究、査読有、44 巻、10 号、2016、pp. 684-687.

ISSN 0387-0200

[学会発表](計 10 件)

K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, X. S. Zhu, Y. Matsuura, Transmission properties of dielectric-coated hollow optical fibers based on stainless tube, Photonics West 2018, 2018. 1. 27, The Moscone Center San Francisco, California, (USA).

岩井 克全、高久 裕之、宮城 光信、均一光学ポリマー内装内径 700  $\mu\text{m}$  中空ファイバの伝送特性、レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会、2018 年 1 月 25 日、京都市勧業館みやこめっせ (京都市)。

岩井 克全、齋藤 亮磨、高久 裕之、宮城 光信、 $\text{CO}_2$  レーザ光伝送用高強度中空ファイバの伝送特性、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、2017 年 9 月 14 日、東京都市大学世田谷キャンパス (東京)。

佐々木 泰大、岩井 克全、高久 裕之、

宮城 光信、内径 75  $\mu\text{m}$  銀中空ファイバ先端素子の製作、平成 29 年度電気関係学会東北支部連合大会、2017 年 8 月 25 日 弘前大学 (青森県・弘前市)。

K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, Improvement of transmission properties of visible pilot beam for polymer-coated silver hollow fibers with acrylic silicone resin as buffer layer for sturdy structure, RIEC and IEEJ International Workshop on Biomedical Optics 2017, 2017. 3. 6, Tohoku. Univ. (Miyagi・Sendai).

K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, Improvement of transmission properties of visible pilot beam for polymer-coated silver hollow fibers with acrylic silicone resin as buffer layer for sturdy structure, Photonics West 2017, 2017. 1. 29, The Moscone Center San Francisco, California (USA).

岩井 克全、高久 裕之、宮城 光信、石 芸尉、Er:YAG レーザ光伝送用光学膜内装銀中空ステンレスファイバの特性、レーザー学会学術講演会第 37 回年次大会、2017 年 1 月 7 日 徳島大学常三島キャンパス (徳島県・徳島市)。

K. Iwai, Y. Matsuura, H. Takaku, M. Miyagi, K. Katagiri, and Y. W. Shi, Improvement of Mechanical Strength of Polymer-Coated, Hollow-Optical Fiber for FT-IR Remote Spectroscopy, The 6<sup>th</sup> Asia Pasific Optical Sensors Conference 2016, 2016. 10. 13, Haoran High-tech Mansion, Shanghai, (China).

岩井 克全、高久 裕之、宮城 光信、石 芸尉、高強度銀中空ファイバの伝送特性の改善、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会、2016 年 9 月 22 日、北海道大学 (北海道・札幌市)。

岩井 克全、高久 裕之、宮城 光信、内径 530  $\mu\text{m}$  銀中空ファイバの可視パイロット光伝送特性の改善、平成 28 年度電気関係学会東北支部連合大会、2016 年 8 月 30 日、東北工業大学 (宮城県・仙台市)。

## 6. 研究組織

### (1) 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：9 0 0 0 6 2 6 3

### (2) 研究分担者

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：1 0 3 6 1 1 3 0