

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 6 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560431

研究課題名(和文)無侵襲内視鏡治療用高機能赤外光伝送システムの研究

研究課題名(英文)Study of a infrared laser light delivery system for noninvasion endoscope treatment

研究代表者

宮城 光信(Miyagi, Mitsunobu)

仙台高等専門学校・その他部局等・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) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：赤外レーザー光を用いる胃のポリープ除去治療では、胃壁表面の水分に吸収されてレーザー光が弱まるため、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、体を全く傷つけず、従来にない新規な「無侵襲」治療を実現するために、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ファイバの導入を提案し、太径(内径0.7 mm)でも急峻に曲げることのできる、従来にない無侵襲志向の内視鏡用高機能・高強度中空ファイバシステムの実現を目的とする。

研究成果の概要(英文)：A new method is proposed to fabricate infrared polymer-coated silver hollow fibers with high mechanical strength for noninvasion endoscope treatment. Polyimide coating is used as a protective polymer to the outer wall of silica glass capillary. Mechanical and transmission properties of the hollow fibers have been discussed.

研究分野：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

(1) 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。

(2) 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 CO₂ レーザ光を伝送するという要求が起こっている。

(3) 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。

(4) 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。

2. 研究の目的

本研究では以下のことを明らかにする。

(1) 高強度用ポリイミド膜外装中空ファイバの開発を行う。高強度用ポリイミド外装膜を形成し、実際の要求を考慮し、曲げ半径 15 mm、曲げ角 270 度で使用可能な高強度中空ファイバ (内径 0.7 mm、長さ 1~2 m) を実現する。

(2) 赤外レーザ複合光伝送用中空ファイバの開発を行う。体液や血液により、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。CO₂ レーザ光は止血能力があるので、2つのレーザ光を同時に照射することで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 CO₂ レーザ光を同時に効率よく伝送可能な光学膜内装銀中空ファイバの開発を行う。

(3) 赤外レーザ複合光伝送装置の構築と評価を行う。高強度中空ファイバを Er:YAG レーザ装置と CO₂ レーザ装置に実装し、機械特性、耐久特性、信頼性など、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

本研究の方法について、以下に示す。

(1) 高強度用ポリイミド膜外装中空ファイバ先端素子の製作と評価

ガラスキャピラリの微小欠陥の成長によるファイバの脆弱性を防ぐために、ガラスキャピラリ内面に保護膜を形成し、その後、銀膜を成膜する手法は、既に銀膜を形成した中空ファイバの高強度化には用いることができない。そこで、内径 0.7 mm、長さ 50 cm の石英ガラスキャピラリチューブに銀薄

膜を内装し、曲げ強度特性を上げるための高強度用ポリイミド膜を外装した中空ファイバ先端素子の製作を行い、製作した先端素子の評価を行う。この手法では、光学膜および銀膜が形成された中空ファイバ先端素子の高強度化を図ることも可能である。

① 高強度用最適ポリイミド溶液の選択

ガラスキャピラリとの付着力、耐久性、耐熱性の観点から最適なポリイミド溶液を選択する。

② 高強度用ポリイミド外装膜のコーティング技術の開発

簡易なディッピング法を用いた高強度ポリイミド膜の成膜技術を確立する。最適膜厚を明らかにする。

③ 高強度用ポリイミド膜外装中空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、曲げ強度試験を行い、ファイバが破断した時の最小曲げ半径を強度の目安とする。

(2) 高強度用ポリイミド膜外装中空ファイバの製作と評価

平成 24 年度の研究成果を基に、ポリイミド膜外装中空ファイバの長尺化を図る。

① 高強度用ポリイミド膜外装中空ファイバのコーティング技術の開発

中空ファイバ (目標長さ 1~2 m) に対して簡易な高強度用ポリイミド外装膜のコーティング技術を確立する。送液速度、乾燥条件など成膜条件を明らかにする。

② 高強度用ポリイミド膜外装中空ファイバの評価

可視～近赤外波長損失特性の測定、曲げ強度試験を行う。

(3) 赤外レーザ複合光伝送用中空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な Er:YAG レーザ光と軟組織の止血効果を有する CO₂ 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) を使い、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。

① 光学膜コーティング技術の開発

Er:YAG レーザ光、CO₂ レーザ光、並びに可視パイロット光の同時伝送に最適な光学膜厚の設計と最適膜厚の成膜技術を確立する。

② 赤外レーザ複合光伝送用中空ファイバの評価

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) 赤外レーザ複合光伝送装置の構築と評価

Er:YAG レーザ装置 (切開用) と CO₂ レーザ装置 (止血用) に高強度中空ファイバを組み込み、想定されるさまざまな形態に用いた時の伝送特性の評価を行う。初期の段階においては、内径 0.7 mm 高強度銀中空ファイバを

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。実験は、Er:YAG レーザ光と CO₂ レーザ光、そして可視パイロット光の同時照射について行い、問題点を明らかにする。さらに高強度 COP 内装銀中空ファイバについても、その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

内径 0.7 mm 中空ファイバの最小曲げ半径は 30 mm であり、高強度化を図るために、外装保護膜として、耐熱性と耐久性および機械特性に優れたポリイミド（日立化成製 HCI-9000）を用いる。ポリイミド膜の形成は、長さ 1 m の V 溝板を用い、長さ 1.2 m の中空ファイバを、V 溝部でポリイミド溶液に浸すことでファイバに外装コーティングした。成膜後、中空ファイバを水平に固定して室温で 24 時間乾燥し、電気炉で加熱乾燥（温度 100°C、30 分）を行った。図 1 に、ポリイミド膜外装中空ファイバの外径特性を示す。

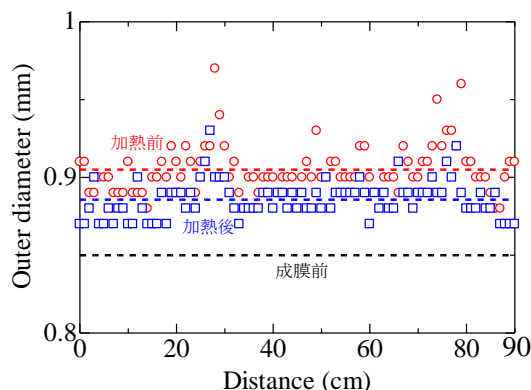


図 1 ポリイミド膜外装中空ファイバの外径特性
但し、○は加熱前、□は加熱後。

図中の○は、加熱前の外径であり、□は加熱後に測定した外径である。成膜前のガラスキャピラリーチューブの外径は 0.85 mm であり、1 回の成膜で約 30 μm の厚さのポリイミド膜をコーティングできた。成膜前のポリイミド膜厚は、約 24 μm であり、厚膜化に成功した。

中空ファイバの強度としては、曲げ半径 $R = 15$ mm、曲げ角 180 度で曲げ、ファイバが破断した曲げ回数を強度の目安とする。銀中空ファイバとポリイミド膜外装銀中空ファイバの曲げ強度特性を測定した。銀中空ファイバは、40 回程度の曲げで折れることがあるが、ポリイミド膜外装銀中空ファイバは、約 400 回曲げることで折れることが分かった。ポリイミド外装保護膜の成膜により、曲げ負荷に強くなることを確認した。

光学膜内装中空ファイバは、内装する光学膜の膜厚を変えることで目的のレーザ光の発振波長で低損失にすることができる。そこで、Er:YAG レーザ光と CO₂ レーザ光の伝送

損失を、幾何光学的手法を用いて理論的に算出することにより、2 波長赤外レーザ光用の最適膜厚の設計を行った。COP 薄膜の膜厚に対する各種レーザ光の伝送損失の理論計算結果を図 2 に示す。ここで伝送する Er:YAG レーザ光の波長は 2.94 μm、CO₂ レーザ光の波長は、10.6 μm、COP の屈折率は 1.53 とした。

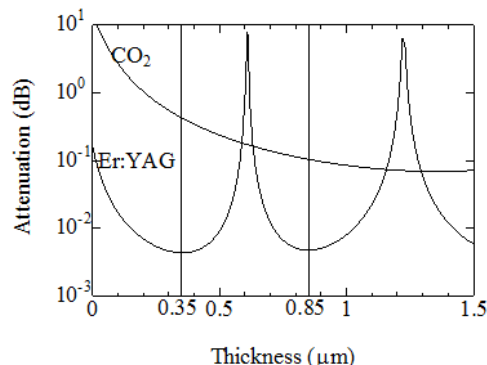


図 2 赤外レーザ複合光伝送用光学膜内装銀中空ファイバの膜厚特性

COP 膜厚を 0.2 ~ 0.4 μm または、0.8 ~ 0.9 μm の範囲で、成膜することで、Er:YAG レーザ光と CO₂ レーザ光を低損失に伝送できることが分かった。

図 3 に、高強度用ポリイミド膜つき COP 膜内装銀中空ファイバの構造を示す。従来の中空ファイバの製作法を用いて、銀膜と環状オレフィンポリマー (COP) 膜の成膜を行った。具体的には、濃度 8 wt% の COP 溶液を、内径 0.7 mm ガラスキャピラリーチューブに 15 cm 吸引し、銀中空ファイバ（内径 0.7 mm、長さ 1.2 m）にシリンジポンプを用いて、送液速度 4 cm/min で送液し、送液後、空気を流しながら室温乾燥 30 分を行い、厚さ 0.33 μm の COP 膜を形成した。また、濃度 12 wt% の COP 溶液を、内径 0.7 mm ガラスキャピラリーチューブに 15 cm 吸引し、銀中空ファイバ（内径 0.7 mm、長さ 1.2 m）にシリンジポンプを用いて、送液速度 6 cm/min で送液し、送液後、空気を流しながら室温乾燥 1 時間を行い、厚さ 0.89 μm の COP 膜を形成した。

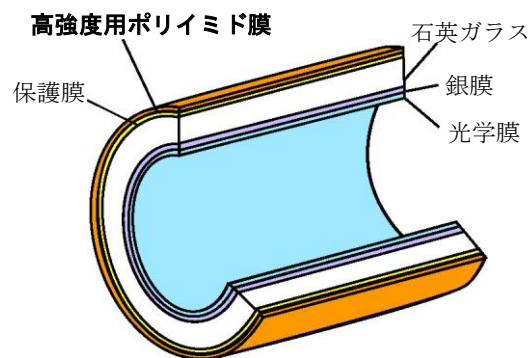


図 3 高強度中空ファイバの構造

図 4 に COP 膜内装高強度中空ファイバ

(内径 0.7 mm、長さ 1.2 m)の損失波長特性を示す。比較として、高強度銀中空ファイバ (Ag)の伝送特性も示す。明確な干渉ピークが見られ、均一な COP 膜が成膜できていると思われる。

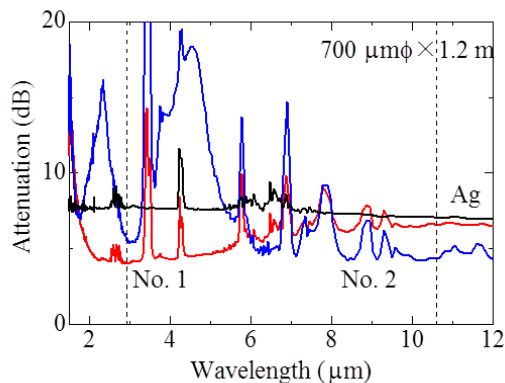


図4 COP内装高強度中空ファイバ(内径0.7 mm、長さ1.2 m)の損失波長特性 (FWHM10.6° のガウスビームにより励振)

No. 1のCOP膜内装高強度中空ファイバの膜厚は0.33 μmであり、No. 2のCOP膜内装高強度中空ファイバの膜厚は0.89 μmである。2波長レーザ光を伝送するのに適した膜厚を成膜できている。

図5に示す測定系で先端曲げ状態でEr:YAGレーザ光とCO₂レーザ光の伝送損失特性の評価を行った。Er:YAGレーザ光を焦点距離48 mmのCaF₂レンズで集光し、結合ファイバ(内径0.7 mm、長さ10 cm)を通して、COP内装高強度銀中空ファイバ(内径0.7 mm、長さ1.2 m)に入射する。中空ファイバの出射端を一定の曲げ半径で曲げ、Er:YAGレーザ光(パルス幅300 μs、繰り返し周波数10 Hz、エネルギー41 mJ)に対する伝送特性を評価した。

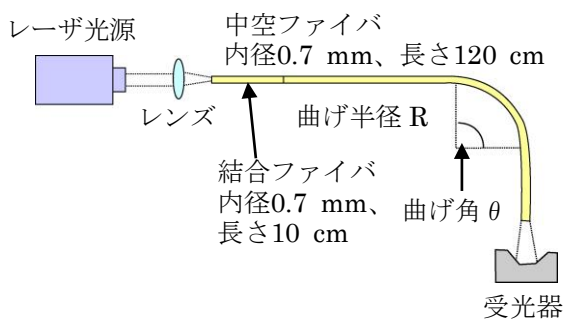


図5 先端曲げ状態でのEr:YAGレーザ光とCO₂レーザ光の伝送損失測定系

結果を図6に示す。No. 1 (COP膜厚0.33 μm)の高強度中空ファイバは、曲げ半径15 mmでも折れず、270°に曲げた際の曲げ付加損失は約1 dB程度であった。直線状態の伝送損失は約1 dBである。No. 2 (COP膜厚0.89 μm)の高強度中空ファイバも、曲げ半径

15 mmで折れず、270°に曲げた際の曲げ付加損失は約1 dB程度であった。直線状態の伝送損失は約2.5 dBである。

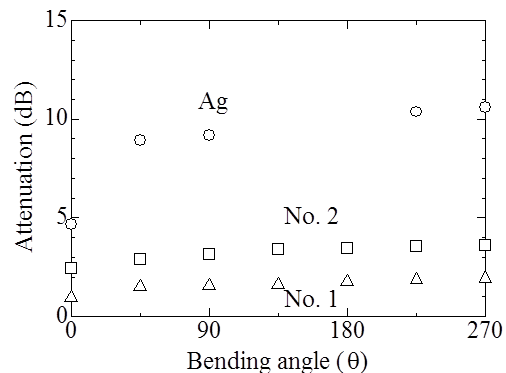


図6 曲げ状態時のEr:YAGレーザ光伝送特性

△: No. 1 □: No. 2 ○: Ag

次に、CO₂レーザ光を焦点距離51 mmのZnSeレンズで集光し、結合ファイバ(内径0.7 mm、長さ10 cm)を通して、COP内装高強度銀中空ファイバ(内径0.7 mm、長さ1.2 m)に入射する。中空ファイバの出射端を一定の曲げ半径で曲げ、CO₂レーザ光(パワー86 mW)に対する伝送特性を評価した。

結果を図7に示す。No. 1 (COP膜厚0.33 μm)の高強度中空ファイバは、曲げ半径15 mm、270°に曲げた際の曲げ付加損失は約5 dB程度であった。直線状態の伝送損失は約5.5 dBである。No. 2 (COP膜厚0.89 μm)の高強度中空ファイバも、曲げ半径15 mmで折れず、270°に曲げた際の曲げ付加損失は約3 dB程度であった。直線状態の伝送損失は約1.5 dBである。Er:YAGレーザ光とCO₂レーザ光を同時伝送する場合、No. 2 (COP膜厚0.89 μm)の高強度中空ファイバが適していると思われる。

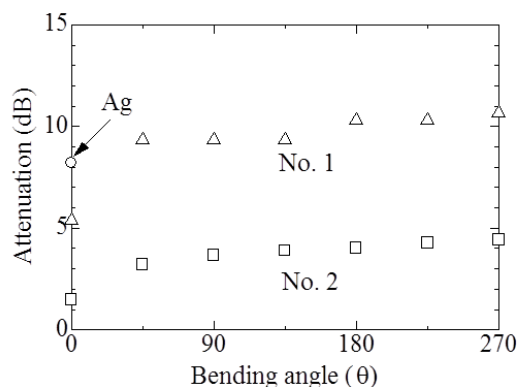


図7 曲げ状態時のCO₂レーザ光伝送特性

△: No. 1 □: No. 2 ○: Ag

No. 2 (COP膜厚0.89 μm)の高強度中空

ファイバの赤色パイロット光 (発振波長 650 nm) の伝送特性の測定を行った。直線状態において入力パワー 5.1 μW で、出射パワー 0.08 μW となり、十分に視認可能であった。

得られた成果の国内外における位置づけとインパクト、今後の展開について、以下に示す。

(1) 太径 (内径 0.7 mm) ファイバで、曲げ半径 15 mm、曲げ角 270 度を実現し、複合赤外レーザ光による無侵襲内視鏡治療の実現した本格的な赤外伝送路は世界最初である。

(2) 素材として、高強度ポリイミド膜外装中空ファイバを採用している例は他にはない。また、水という高吸収帯で可視光~CO₂レーザ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レーザと Er:YAG レーザ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。

(3) 従来の伝送効率を犠牲にして曲げ強度を優先した内径 0.32 mm 細径中空ファイバ伝送システムに対して、内径 0.7 mm の高強度中空ファイバを実現することで、高出力かつ伝送効率を飛躍的に向上し、レーザ光源の低出力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 (最小侵襲による治療) が叫ばれている医療現場において、レーザ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強度中空ファイバを実現することは、大きな意味を持つ。また、治療・療養期間の短縮化の効果も十分あり、体に全く傷つけない Non-invasive medicine (無侵襲治療) を目指す意義は極めて大きい。

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)

- ① K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, "Improvement of transmission properties for a rugged polymer-coated silver hollow fiber," Proc. SPIE Vol. 9317, (2015, in press), 査読有。
- ② K. Iwai, K. Takahashi, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, "Fabrication of 50- μm -bore hollow fiber for infrared transmission," Proc. SPIE Vol. 8938, pp. 893808-1-893808-8, doi:10.1117/12.2036666, (2014), 査読有。
- ③ M. Nemeč, H. Jelinkova, M. Miyagi, K.

Iwai and M. Doroshenko, "Delivery of 3-5 μm laser radiation by a hollow waveguide," Laser Phys. Vol. 24, Issue 4 pp. 1-5, doi:10.1088/1054-660X/24/4/045806 (2014), 査読有。

- ④ K. Iwai, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, "Fabrication of a rugged polymer-coated silver hollow fiber with a vitreous film for the infrared," Proc. SPIE Vol. 8576, pp. 857602-1-857602-9, doi:10.1117/12.2002364 (2013), 査読有。
- ⑤ X. Zeng, B. H. Liu, Y. J. He, B. S. Sun, K. Iwai, M. Miyagi, Y. W. Shi, "Fabrication and characterization of AgI/Ag hollow fibers for near-infrared lasers," Optics & Laser Technology, Vol. 49, pp. 209-212, http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2013.01.010 (2013), 査読有。

[学会発表] (計 17 件)

- ① A. Seki, K. Iwai, Y. Matsuura, "Photoacoustic imaging probe using ultra-thin hollow optical fibers," The Joint Symposium of 9th International Symposium on Medical, Bio- and Nano-Electronics, 6th International Workshop on Nanostructures & Nanoelectronics, (Poster) (2015. 3. 2-4, Tohoku University, Japan).
- ② K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, "Improvement of transmission properties for a rugged polymer-coated silver hollow fiber," Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XV, (2015. 2. 7, The Moscone Center San Francisco, California, USA).
- ③ 岩井 克全, 加藤 瑞基, 高久 裕之, 宮城 光信, 石 芸尉, "高強度ポリマー内装中空ファイバの可視パイロット光伝送特性の改善," 第 35 回レーザー学会学術講演会, 12aV06, (2015. 1. 12. 東海大学高輪校舎 東京都).
- ④ 関 淳, 岩井 克全, 松浦 祐司, "超細径中空光ファイバを用いた光音響イメージングシステムの構築," 第 35 回レーザー学会学術講演会, 12aV02, (2015. 1. 12. 東海大学高輪校舎 東京都).
- ⑤ 岩井 克全, 高久 裕之, 宮城 光信, 石 芸尉, "AgI 内装内径 50 μm 中空ファイバの製作," 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, B-13-17, (2014. 9. 24 徳島大学 徳島市).
- ⑥ 関 淳, 岩井 克全, 松浦 祐司, "超細

- 径中空光ファイバを用いた光音響イメージング,”平成26年度電気関係学会東北支部連合大会, 2F08, (2014. 8. 22 山形大学 山形県米沢市).
- ⑦ 高久 裕之, 岩井 克全, 宮城 光信, 石 芸尉, “低温コーティングによるAgI/Ag中空ファイバの送液法の改善,”平成26年度電気関係学会東北支部連合大会, 2F07, (2014. 8. 22 山形大学 山形県米沢市).
- ⑧ 加藤 瑞基, 岩井 克全, 高久 裕之, 宮城 光信, “無機保護膜内装高強度太径中空ファイバー無機保護膜の成膜条件一,”平成26年度電気関係学会東北支部連合大会, 2F06, (2014. 8. 22 山形大学 山形県米沢市).
- ⑨ K. Iwai, K. Takahashi, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, “Fabrication of 50- μ m-bore hollow fiber for infrared transmission,” Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XIV, (2014. 2. 1, The Moscone Center San Francisco, California, USA).
- ⑩ 岩井 克全, 加藤 瑞基, 高久 裕之, 宮城 光信, 石 芸尉, “高強度中空ファイバの可視パイロット光伝送特性の改善,”第34回レーザー学会学術講演会, I522aV09, (2014. 1. 22. 九州国際会議場北九州市).
- ⑪ 岩井 克全, 高久 裕之, 加藤 瑞基, 宮城 光信, 石 芸尉, “内視鏡治療用中空ファイバの曲げ強度特性,”電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, B-13-8, (2013. 9. 17 福岡工業大学福岡市).
- ⑫ 高橋 洸基, 岩井 克全, 宮城 光信, 石 芸尉, “内径50 μ m銀中空ファイバ先端素子の製作,”平成25年度電気関係学会東北支部連合大会, 2H21, (2013. 8. 23 会津大学 福島県会津若松市).
- ⑬ K. Iwai, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, “Fabrication of a rugged polymer-coated silver hollow fiber with a vitreous film for the infrared,” Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics and Treatment Applications XIII, (2013. 2. 2, The Moscone Center San Francisco, California, USA).
- ⑭ 岩井 克全, 高久 裕之, 宮城 光信, 石 芸尉, “AgI/Ag中空ファイバの送液法の改善,”第33回レーザー学会学術講演会, I128aIII04 (2013. 1. 28. 姫路商工会議所・イーグレ姫路姫路市).
- ⑮ 岩井 克全, 入島 真, 高久 裕之, 宮城 光信, 石 芸尉, “ポリイミド膜を用いた高強度中空ファイバの製作,”電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, B-13-20, (2012. 9. 12 富山大学五

福キャンパス 富山市).

- ⑯ 鈴木 雅尚, 岩井 克全, 宮城 光信, 石 芸尉, “内径100 μ m無機薄膜内装銀中空ファイバ ー無機薄膜の成膜条件一,”平成24年度電気関係学会東北支部連合大会, 2F05, (2012. 8. 31 秋田県立大学本荘キャンパス 秋田県由利本荘市).
- ⑰ 佐藤 敬済, 岩井 克全, 宮城 光信, 石 芸尉, “無機保護膜内装高強度銀中空ファイバ先端素子,”平成24年度電気関係学会東北支部連合大会, 2F04, (2012. 8. 31 秋田県立大学 本荘キャンパス 秋田県由利本荘市).

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

特になし

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・

その他部局等・名誉教授

研究者番号：90006263

(2) 研究分担者

岩井 克全 (Iwai Katsumasa)

仙台高等専門学校・

情報ネットワーク工学科・准教授

研究者番号：10361130