

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 7 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：24500563

研究課題名(和文) 極細径内視鏡対応高機能伝送路の研究

研究課題名(英文) Study of a ultra-thin optical fiber for endoscope treatment

研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)： 根管治療等の内視鏡を用いた低侵襲治療にEr:YAGレーザを導入するため、1．内径50 μ mという超細径でEr:YAGレーザ光を伝送可能、2．高耐久性で、曲げ半径1mmで使用可、3．製作法が単純で、低コスト化が可能なる特長を有する極細径中空ファイバ(長さ30mm)の製作を行う。現存する赤外ファイバに対して、信頼性、耐久性、機能、価格の上で極めて優位なファイバの製作技術を開発する。

研究成果の概要(英文)：Extremely flexible hollow fibers with 0.05 mm-bore size were developed for infrared laser light delivery. The silver layer was inner-plated by using the silver mirror-plating technique. Thin dielectric layer was formed by using liquid-phase coating method for low-loss transmission of Er:YAG laser light.

研究分野：総合領域

キーワード：中空ファイバ 赤外レーザ光 先端機能デバイス レーザ治療

1. 研究開始当初の背景

治療用の数多くのレーザーの中、波長が 2 μ m 以上の赤外波はその有効性が確認されつつも、レーザー発振器から患部へのレーザー光の導光手段は従来の石英光ファイバが使えないため、最近では中空ファイバが多く使用されてきている。また、効率的な内視鏡治療を行うためには、患部に接触して使用できること、高効率でレーザー光を導光できること、高エネルギー伝送に耐えること、内視鏡に挿入可能な細径ファイバであること、更に歯根まで到達できることが要求されている。現時点ではこの要求性能を満たす中空ファイバが無いため、導光効率を犠牲にした短尺の中実のガラスファイバ素子 (30 mm) が使用されている。極細径内視鏡用の場合、ファイバの細径化によるレーザーエネルギー密度の増加で従来の光学ポリマー膜の損傷が問題となるが、最近、耐久性に極めて優れた無機ガラス材料を用いた中空ファイバ先端素子 (内径 100 μ m、長さ 10 cm) の試作に成功した。本研究で無機ガラス薄膜を内装した極細径中空ファイバが実現されれば、その導光効率の高さ、高耐久性、超細径のメリットで、歯科内視鏡などの低侵襲治療の際、極めて細かい操作が可能となり、高効率化を図ることができる。本申請では、

(1) 無機材料が内面にコートされた銀中空ファイバで高強度である

(2) 内径 50 μ m、外径 150 μ m の極細径中空ファイバ (長さ 30 mm) として機能する

(3) 製作法が単純で、低コスト化が可能である

などの特長を有し、現存する赤外伝送路に対して、機能、価格、体内における医療応用の範囲の上で極めて優位に立つことが期待される。技術課題は、極細径中空ファイバへの平滑な銀膜の形成技術、無機ガラス材料の同様成膜技術、ならびに先端封止製作技術である。

2. 研究の目的

本研究では以下のことを明らかにする。

(1) 極細径銀中空ファイバの製作

液相法による銀膜形成条件の検討

目標値：内径 50 μ m、長さ 100 mm

(2) 無機薄膜内装細径中空ファイバの開発
ポリシロキサン液相法による無機薄膜の成膜条件の検討

検討項目：溶液濃度、送液速度、乾燥条件

目標値：内径 50 μ m、長さ 30 mm、Er:YAG レーザ光の目標透過率 60 %

(3) 無機薄膜内装細径中空ファイバの先端封止技術の開発

先端ガラス部の熔融による封止

目標値：先端封止部の Er:YAG レーザ光の

目標透過率 70 %

3. 研究の方法

本研究の方法について、以下に示す。

(1) 低損失極細径銀中空ファイバの製作と評価

複合レーザー光伝送を行うためには、表面の粗さの小さい良好な銀膜の成膜が重要である。内径 50 μ m、長さ 200 mm のガラスキャピラリーチューブ内面に平滑な銀膜を銀鏡反応で成膜する。具体的な手段、方法およびその内容は下記の通りである。

① 銀膜のコーティング技術の開発

銀鏡反応による銀膜の形成を行う。銀中空ファイバの製作条件 (溶液温度、流量、送液時間) の検討を行う。

② 低損失極細径銀中空ファイバの評価

内径 50 μ m、長さ 100 mm の銀中空ファイバの赤外波長損失測定を行う。中空ファイバの内径が細くなると流量は減り、ファイバ内面に粗い銀が形成される。そこで石英ガラスキャピラリーチューブ (内径 50 μ m、長さ 200 mm) を数百本束ねたバンドルを製作し、断面積を大きくすることで、流量の増加を行う。流量については、これまで製作した内径 700 μ m 銀中空ファイバの製作条件から 10 ml/min 程度を目標とする。低損失な極細径銀中空ファイバの効率よい製作法について検討を行う。

(2) 無機ガラス薄膜内装細径中空ファイバの製作

人体組織に強く吸収され、効率のよい蒸散・切開が可能な Er:YAG レーザ用の赤外ファイバとして、銀膜の上に更に無機薄膜がコートされた中空ファイバの製作を行う。

① 耐久性無機薄膜のコーティング技術の開発

無機溶液の送液・乾燥法による薄膜の同様成膜と溶液固化技術を明らかにする。送液法による無機薄膜の形成を行う。無機薄膜内装銀中空ファイバの製作条件 (溶液濃度、送液速度、乾燥時間) の検討を行う。中空ファイバの内径が細くなると、溶液の流速が急激に速くなる。そのため、送液系の接続点におけるチューブ径の違いにより、送液速度が変化し、ファイバ上・下部で膜厚変動を生じる。そこで、マイクロチューブポンプ内のチューブ (内径 1.15 mm) に内径 0.3 mm、外径 0.4 mm のシリコンチューブを挿入し、通常用いる内径 0.7 mm の接続チューブから内径 250 μ m の接続チューブに変更することで、接続点における送液速度の変動を抑え、均一な無機薄膜形成を行う。低損失な極細径中空ファイバの効率よい製作法について検討を行う。

② 室温硬化型無機溶液の選択

Er:YAG レーザ波長での透明性、銀膜との付着力、耐久性から最適な室温硬化型無機溶液の選択を行う。

(3) 細径中空ファイバの先端封止技術の開発と性能評価

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もつ 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。

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一様成膜技術を確認する。

② 赤外レーザ複合光伝送用中空ファイバの評価

内視鏡を用いた医療装置に中空ファイバを導入する場合、レーザ光により切除された飛散物がファイバ内部に侵入し、損傷を引き起こす。そこでファイバ先端の溶融による先端封止などの簡易・廉価な手法の開発を行う。Er:YAG レーザ装置に製作した無機薄膜内装極細径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。

① 先端封止技術の開発

酸素バーナーや光融着接続機を用いたファイバ先端の溶融による封止などの簡易・廉価な製法について検討を行う。

② 無機薄膜内装細径中空ファイバの評価

Er:YAG レーザならびに可視パイロット光の伝送特性、曲げ損失特性、耐久性試験(オートクレーブ滅菌処理、最小曲げ半径強度試験)、近赤外光、可視光を同時に伝送し、その効率には赤外光で 60%、可視光で 20%以上とする。

4. 研究成果

銀膜の形成は銀鏡反応により行う。図 1 に内径 50 μm 銀中空ファイバの製作装置を示す。

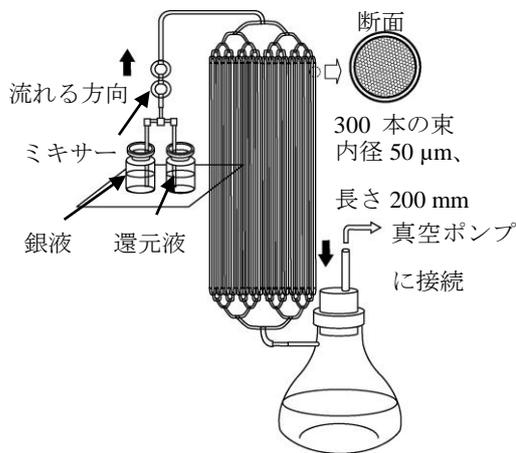


図 1 極細径銀中空ファイバの製作装置

中空ファイバの内径が細くなると、銀鏡反応溶液の流速が低下し、ファイバ内面には粗い銀膜が形成される。そこで、(1) 前処理として SnCl₂ 溶液を用いることにより、ガラスキャピラリーに銀が付着する速度を飛躍的に速くし、短時間での膜形成を行う。(2) 石英ガラスキャピラリー (内径 50 μm、外径 150 μm、

長さ 20 cm) を 300 本束ねたバンドルを製作し、断面積を大きくすることで、流量の増加を行った。流量については、これまで製作した内径 320 μm 銀中空ファイバの製作条件から、10 ml/min 程度を目標とする。

図 2 にガラスチューブのバンドル数に対する流量を示す。300 本束ねたセット (長さ 20 cm) を 1 セット単一で接続した場合、流量は 1 ml/min 程度となり、特性の良い銀中空ファイバの製作条件ではなかった。そこで、この 300 本のセットを並列に 16 本接続したところ、流量が 19 ml/min 程度となり、安定に製作できる条件になった。この条件で銀鏡反応を行い、銀鏡反応の溶液温度 16°C、銀鏡時間 3 分、その後、窒素ガスを流しながら、室温乾燥を 30 分行った。

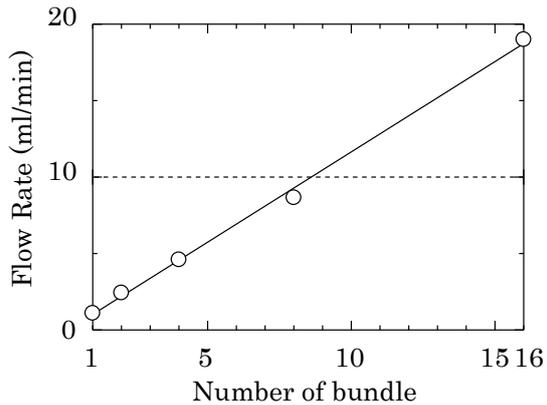


図 2 内径 50 μm ガラスキャピラリーチューブのバンドル本数に対する流量

図 3 に内径 50 μm 銀中空ファイバ先端素子の可視～近赤外波長帯における損失波長スペクトル (FWHM10.6 ° のガウスビームで励振) を示す。

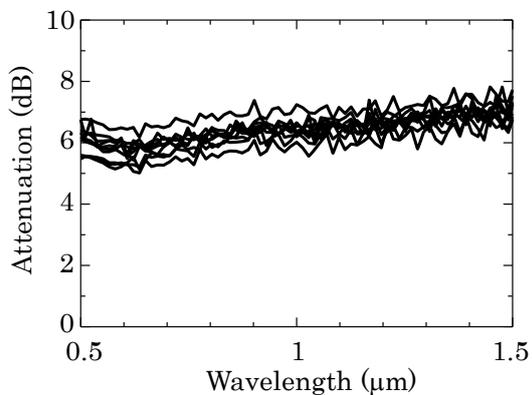


図 3 超細径銀中空ファイバの可視-近赤外の損失波長スペクトル (FWHM10.6 ° のガウスビームで励振)

ファイバ損失値は、最大値と最小値の差が 2 dB 程度とファイバの伝送特性にばらつきがあることが分かる。これは、バンドル形成の際、端面を揃える事が困難であり、溶液の流れ易さが各ファイバで異なってしまったためと思われる。波長 1 μm において、最も

低損失なファイバ（長さ 30 mm）は、6 dB であり、この装置で十分低損失なファイバを製作できることが分かった。

医療用赤外レーザ光伝送路には、耐久性を考慮すると AgI 膜を内装した銀 (Ag) 中空ファイバが有効である。ヨウ素 (粒) の溶剤にエタノールを用い、超音波 (40 kHz) 照射と攪拌を 10 分程度行い、ヨウ素液を製作した。図 4 に AgI 膜の成膜装置を示す。石英チューブを母材とした銀中空ファイバ (内径 50 μm 、長さ 10 cm) を 8 本束ねたバンドルを製作し、水平に固定して、ヨウ素 (I_2) 液 (濃度 1 wt%) を、シリンジポンプを用い送液する。送液速度は、2 cm/sec である。室温 (約 21 $^{\circ}\text{C}$) で、ヨウ素液を送液後、窒素ガスを流しながら、室温乾燥を 30 分行った。乾燥後、ファイバ上部と下部を 1 cm ずつ切断した。

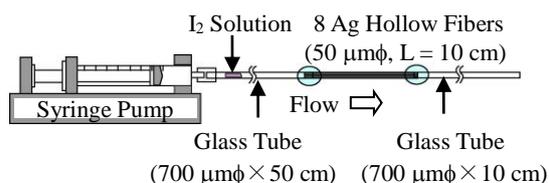


図 4 AgI 内装内径 50 μm 中空ファイバの製作装置

図 5 に製作した AgI 内装銀中空ファイバ (AgI/Ag、内径 50 μm 、長さ 8 cm) の可視近赤外波長帯における損失波長特性 (FWHM 10.6 $^{\circ}$ のガウスビームで励振) を示す。図中の数値は、ヨウ素液の送液量である。

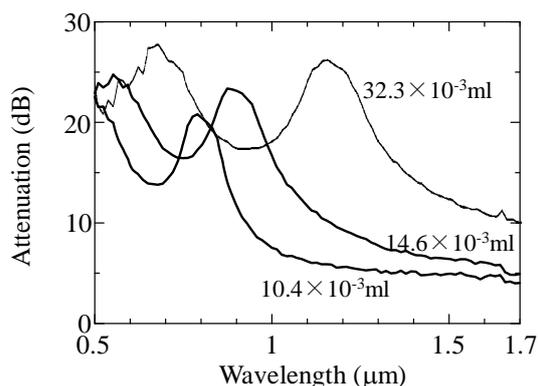


図 5 AgI 内装銀中空ファイバ (内径 50 μm 、長さ 8 cm) の損失波長特性 (FWHM 10.6 $^{\circ}$ のガウスビームにより励振)

どのファイバも干渉ピークが見られ、ファイバ内に均一な AgI 膜を形成できていると思われる。それぞれの干渉ピークから AgI 膜の膜厚を推定した。図 6 にヨウ素液の送液量に対する AgI 膜の膜厚特性を示す。同じ送液量で製作した場合の膜厚変動は、約 $\pm 0.016 \mu\text{m}$ であった。ヨウ素液の送液量約 $32 \times 10^3 \text{ ml}$ までは、送液したファイバ 8 本中、全てに干渉ピークが見られたが、送液量約 $43 \times 10^3 \text{ ml}$ で、8 本中 3 本、送液量約 $59 \times 10^3 \text{ ml}$ で、8

本中 5 本に干渉ピークが現れなかった。これは、ヨウ素液と銀膜との反応により銀膜の大部分がヨウ化銀膜に変化したためと思われる。このことから、極細径中空ファイバ (内径 50 μm 、長さ 8 cm) に成膜可能なヨウ化銀膜は、送液量約 $32 \times 10^3 \text{ ml}$ で成膜した約 0.15 μm と分った。Er:YAG レーザ光伝送に適した AgI 膜の膜厚は約 0.12~0.22 μm であることから、十分に有効な膜厚である。

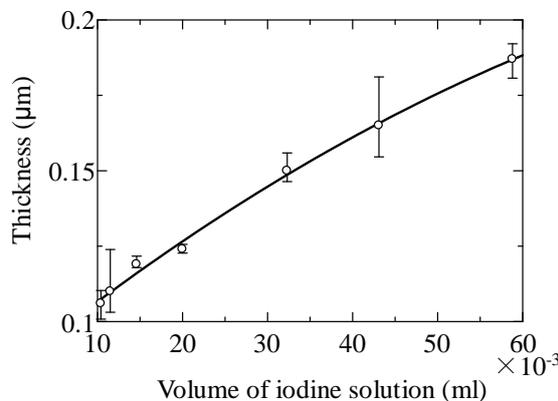


図 6 ヨウ素液の送液量に対する AgI 膜厚

根管治療など、限られた空間で効率よくレーザ光の照射位置を変える先端素子として、石英ガラスキャップを利用し、レーザ側方照射素子を製作した。用いる中空ファイバの内径 / 外径は 50 / 150 μm であり、レーザ側方照射先端素子は内径 180 μm とする。まず母材となる石英ガラスチューブ (内径 180 μm 、外径 340 μm) の先端をガスバーナーで加熱溶解させ封止し、石英ガラスキャップを製作した。製作した石英ガラスキャップ (封止部のガラス厚 0.2 mm) を図 7 に示す。加熱する際に、窒素ガス (50 ml/min) を流しながら、封止することで、内面形状を凸型に形成できる。

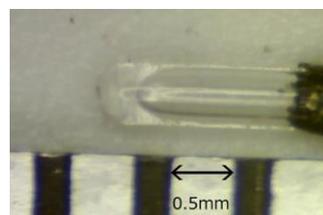


図 7 石英ガラスキャップ

LD (波長 635 nm) を光源として、石英ガラスキャップを装着した内径 50 μm 中空ファイバ (長さ 9 cm) に入射し、出射特性を測定した。石英ガラスキャップの伝送損失は、1.4 dB となった。Er:YAG レーザ光を用いて、出射特性を測定した。石英ガラスキャップの伝送損失は 2.2 dB であった。

次に、石英ガラスキャップ (先端ガラス厚 0.4 mm) の先端部を研磨により円錐状に加工することで、レーザ側方照射先端素子 (研磨後の先端ガラス厚 0.33 mm) の製作を行った。製作したキャップを図 8 に示す。図 9 に示す測定系で出射光強度の角度分布を測定した。

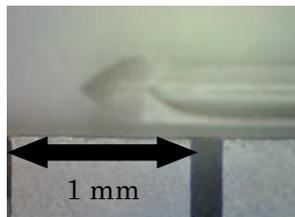


図 8 レーザ側方照射先端素子

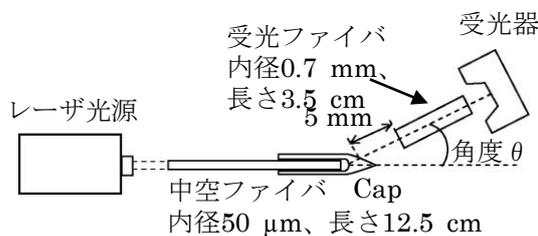


図 9 出射光強度分布の測定系

検出器に短い(長さ 3.5 cm)中空ファイバを設置することでキャップ (Cap)近傍のパワー分布を測定可能である。内径 50 μm 銀中空ファイバ (長さ 12.5 cm)にレーザ側方照射素子 (先端角 77°)を装着し、LD (波長 635 nm)の出射光強度分布を測定した結果を図 10 に示す。

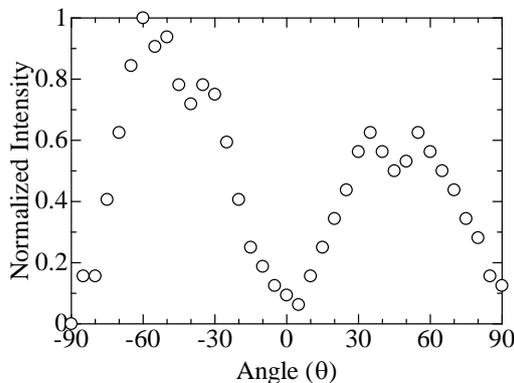


図 10 先端角 77° キャップの出射光強度分布

ピークは 60° 付近にあり、側方に出射されることが確認された。

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) Er:YAG レーザ治療器の伝送路で、低損失、細径化が可能なることから、極細径内視鏡治療への応用が期待される。

(2) 無機ガラスを採用している極細径中空ファイバは他にない。内径 50 μm の極細径中空ファイバへ無機薄膜をコートする技術、溶液固化による無機媒質の形成手法はない。

(3) 従来の導光効率を犠牲にした Er:YAG レーザ用の短尺な充実型ガラスファイバに対して、高エネルギー伝送ならびに滅菌工程に耐える細径中空ファイバが実現できれば、内視鏡治療において、Er:YAG レーザ光を効率よく用いることができる。また導光効率の飛躍的な向上により、レーザ光源の低出力化に繋がり経済性のメリットも生じる。内径 50

μm の極細径なファイバは、子供の細く曲がった歯根などにも対応できる。最小侵襲治療が叫ばれている医療現場において、レーザによる低侵襲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ニーズが大きい。経済性を考慮しつつ、医療現場において感染症を防止することも重要な課題である。これらの要求を一度に満たす手段として、耐久性の高い無機材料を用い、製作が容易でしかも滅菌可能な、もしくはディスプレイブルな医療用ファイバを実現することは、極めて大きな意味を持つ。また、治療・療養期間の短縮化、高齢者保護の上で、その社会的な効果も十分ある。

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. Jelinková, 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- μm -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, 1522aV09, (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 洗基, 岩井 克全, 宮城 光信, 石 芸尉, “内径 50 μm 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 μm 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
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