

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 4 日現在

機関番号：51303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420327

研究課題名(和文)内視鏡用高強度先端部一体型赤外伝送路の開発

研究課題名(英文)Development of Infrared Optical Fibers with Rugged Distal End for Endoscope

研究代表者

高久 裕之(TAKAKU, Hiroyuki)

仙台高等専門学校・総合工学科・研究員

研究者番号：20705016

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)：Er:YAGレーザーは、各診療科目に急速にその応用が展開されている。それは中空ファイバにより、Er:YAGレーザー光の安定伝送が可能になったからである。内視鏡治療に対応可能な太径中空ファイバ(内径700 μm)先端素子の製作に成功したが、接続方法に問題がある。本研究では、曲げ半径15mm、曲げ角270 $^{\circ}$ で使用可能な長さ30cmの高強度先端部と長さ90cmの低損失伝送部を有する高強度先端部一体型中空ファイバ(内径700 μm)を製作した。Er:YAGレーザー光と波長650nmの赤色LD光の伝送損失は、直線状態で1dBと6.9dB、曲げ角270 $^{\circ}$ 、曲げ半径15mmで、1.9dBと9.4dBであった。

研究成果の概要(英文)：A silica glass capillary is used as the substrate and vitreous film is firstly coated on the inner surface of the capillary to protect the glass tube from moisture. This protective coating keeps the thin-wall glass tube away from damage due to the following silver plating process. The additional transmission loss caused by the roughness of the protective film is decreased by limiting the length of the protective film. The whole length of 0.7-mm-bore hollow fiber was 1.2 m and the length of the rugged part which formed the protective film was only 30 cm. Transmission properties of the rugged polymer-coated silver hollow fibers for the Er:YAG laser and red pilot beam delivery have been improved. The loss for the 0.7- μm -bore size, 1.2-m-length rugged polymer-coated silver hollow fiber was 1 dB and 6.9 dB under straight condition, and 1.9 dB and 9.4 dB under the condition of a 270 degree bend with a 15-mm bending radius at the wavelength of 2.94 μm and 650 nm, respectively.

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

(1) 国内外での関連する研究の中での当該研究の位置づけとして、内視鏡治療で Er:YAG レーザ用伝送路に関する現状を下記に示す。

フレキシブルで機械的に安定なファイバは中空ファイバのみである。

内視鏡治療に対応できるファイバはまだ存在しない。

高強度先端部を持ち、レーザ光を低損失に伝送する構造を有する赤外伝送路は存在しない。

(2) 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、銀膜の成膜の際に、強度が劣化して、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、フレキシブルに扱えるが、入射系の構築が複雑であり、また高出力赤外伝送が困難である。

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。

(3)そこで、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に、次の着想に至った。

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ぐ。

保護膜を成膜する部分を、内視鏡の先端可動部分に限定することで、保護膜の粗さによるファイバ全体の伝送損失の増加を抑制する。

高強度伝送用と、低損失伝送用の中空ファイバ構造を1本の中空ファイバに実装することで、高強度部と低損失伝送部が一体となり、接続損失や接続部の太径化を生じない。

2. 研究の目的

(1) 高強度先端部一体型中空ファイバの開発を目的とし、次のことを明らかにする。

内視鏡に挿入可能な、高強度先端部(長さ30 cm)と低損失伝送部(長さ70 cm)を有する内径700 μm 中空ファイバを実現する。

高強度先端部は、曲げ半径15 mm、曲げ角270度で破壊しない中空ファイバを実現する。

可視パイロット光と Er:YAG レーザ光を同時伝送可能な内視鏡治療用赤外伝送路を実現する。

高反射膜として環状オレフィンポリマー(COP)を用いることで、Er:YAG レーザ光の伝送効率を、70%以上、可視パイロット光の伝送効率を、10%以上とする。

3. 研究の方法

(1) 高強度先端部一体型銀中空ファイバの製作

Er:YAG レーザ光などの赤外レーザ光を体内治療に応用するためには、安全で高効率伝送可能な赤外伝送路が要求されている。技術課題は、内径700 μm と太径でありながら、曲げ半径15 mm、曲げ角270°で可動できる中空ファイバを製作することである。ガラスキャピラリ母材は、上記の曲げ条件に耐えるが、高反射膜の銀膜を成膜した後に、中空ファイバの曲げ強度は劣化することが報告されている。強度劣化の原因は、銀鏡反応時の水溶液によるガラスキャピラリの微小欠陥の成長によるものである。対策として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により、強度劣化を防ぐことができると分ったが、保護膜を成膜すると、ガラス表面より粗くなるため、伝送損失は増加した。そこで、内視鏡治療において、曲げ強度を必要とする赤外伝送路の先端部分30 cmのみを高強度化することで、伝送路全体の伝送損失の増加を抑制し、高強度+低損失な内視鏡治療用中空ファイバの製作を図る。具体的な手段、方法およびその内容は下記のとおりである。

高強度用最適無機保護膜の選択

ガラスキャピラリとの付着力、耐久性、耐熱性の観点から、最適な無機保護膜を選択する。

高強度用先端部の無機保護膜コーティング技術の開発

簡易な液相法を用いた高強度用先端部への無機保護膜の成膜技術を確立する。最適膜厚を明らかにする。

高強度先端部一体型銀中空ファイバの製作

高強度先端部として、無機保護膜を長さ30 cm程度に成膜したガラスキャピラリ(内径700 μm 、全長100 cm)に銀鏡反応を用いて、銀膜を成膜する。

高強度先端部一体型銀中空ファイバの評価

製作した高強度先端部一体型銀中空ファイバの可視~近赤外波長損失特性の測定、曲げ強度試験を行う。

(2) 高強度先端部一体型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 レーザ光と可視パイロット光を同時伝送可能な高強度先端部一体型中空ファイバの製作を行う。高反射膜として環状オレフィンポリマー(COP)を用い、膜厚を数十 nm オーダーで精密に制御し、最適膜厚の成膜を行う。具体的な手段、方法およびその内容は下記のとおりである。

低損失化用最適光学膜厚の設計

銀膜との付着力があり、均一な成膜ができ、最適膜厚の成膜ができる高反射膜として、環状オレフィンポリマー(COP)を用い、Er:YAG レーザ光並びに可視パイロット光の同時伝

送)に最適な光学膜の設計を行う。

低損失化用光学膜コーティング技術の開発

Er:YAG 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の最適膜厚の一樣成膜技術を確立する。

(3)Er:YAG レーザ光伝送装置の構築と評価

具体的な手段、方法およびその内容は下記のとおりである。

Er:YAG レーザ装置への導入

Er:YAG レーザ装置に高強度先端部一体型中空ファイバを組み込み、想定される様々な形態に用いた時の伝送特性の評価を行う。

高強度先端部一体型中空ファイバの評価

高強度先端部一体型中空ファイバと従来の中空ファイバを比較し、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。

4. 研究成果

内視鏡治療において、曲げ強度を必要とする赤外伝送路の先端部分 30 cm のみを高強度化することで、伝送路全体の伝送損失の増加を抑制し、高強度かつ低損失な内視鏡治療用中空ファイバの製作を行う。図 1 に提案する高強度中空ファイバを示す。

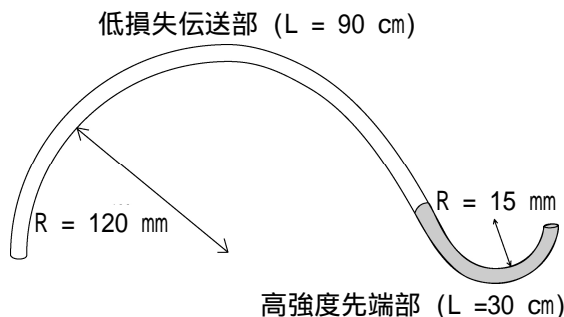


図 1 提案する高強度中空ファイバ

図 2 に提案する高強度中空ファイバの構造を示す。内視鏡に挿入可能な、高強度先端部 (長さ 30 cm) と低損失伝送部 (長さ 90 cm) を有する内径 0.7 mm 中空ファイバで構成される。

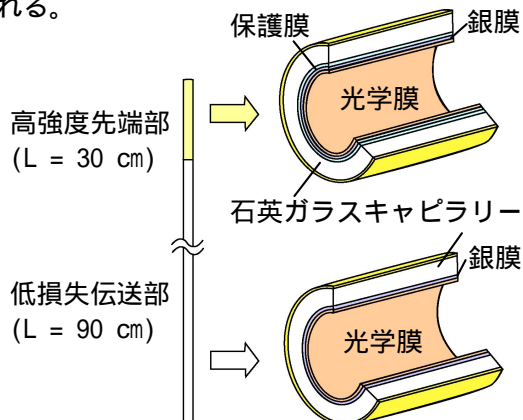


図 2 高強度中空ファイバの構造

保護膜として、無機膜を用いる。有機樹脂膜を保護膜とした際の課題である接着性、膜の安定性などを解決でき、簡便な送液法により、高強度中空ファイバの耐久性、耐熱性を飛躍的に向上することが可能である。無機保護膜は、送液後、室温で 1 時間乾燥され成膜されている。Ag/buffer 中空ファイバの製作の際、Ag 膜の成膜を安定に行うためには、保護膜と Ag 膜の接着性を上げることが必要である。そのために、すでに COP 用に開発されているいくつかのプライマーに着目し、種々の実験を行った結果、溶剤にトルエン 16 % 程度とメチルイソブチルケトンとの混合系を用いたオレフィン系エラストマー変性物である ZPP1 (日本ゼオン社製) を選択した。これまでの成果から、必要な保護膜厚は約 $0.2 \mu\text{m}$ であった。保護膜の膜厚を目標の約 $0.2 \mu\text{m}$ にするために、濃度 9.9 wt% で製作した膜厚約 $0.1 \mu\text{m}$ の無機保護膜を有するガラスキャピラリーに膜厚約 $0.1 \mu\text{m}$ の ZPP1 膜を成膜することで有効な保護膜の成膜を行った。

図 3 に、マイクロチューブポンプを用いた内径 0.7 mm 保護膜内装ガラスキャピラリーの製作装置を示す。まず、石英ガラスチューブ (内径 0.7 mm, 長さ 1.2 m) に、濃度 9.9 wt% の無機溶液を 4 cm/min の速度で送液し、先端部 30 cm まで無機溶液が進んだところで、マイクロチューブポンプを逆回転させ、同じ送液速度で、無機溶液を押し出し、その後、窒素雰囲気下の室温で 1 時間乾燥して、無機膜を成膜した。次に、無機膜と Ag 膜の接着性を上げるために、プライマーの ZPP1 を、無機溶液と同様にコーティングを行い、窒素雰囲気下の室温で 30 分間乾燥した。

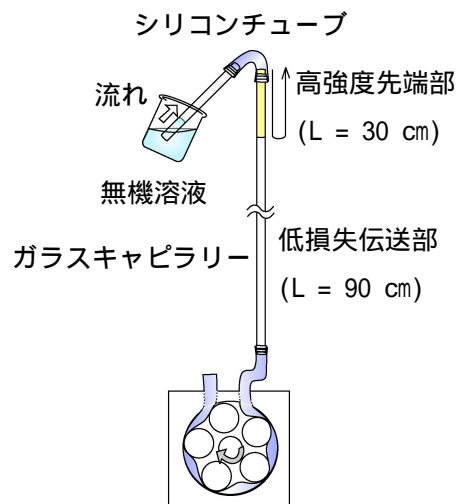


図 3 無機保護膜の成膜装置

銀鏡反応によって Ag 膜を成膜する。可視パイロット光の伝送特性の改善を図るために、銀鏡反応の前処理液として SnCl_2 溶液 (濃度 9 wt%) を導入した。従来法に比べ、銀

膜が付着する速度が速くなり、短時間で銀膜形成が可能になった。真空ポンプにより、銀液と還元液を吸い上げ、ミキサー部で混合させた溶液をバンドルに流し、内面に銀を成膜する。銀鏡反応時間は3分15秒とした。銀鏡反応後に後洗浄(蒸留水3分間、エタノール1分間流す)を行い、その後、窒素を流しながら室温乾燥を30分間行った。

図4にAg/ZPP1/buffer中空ファイバの可視波長域の損失スペクトル(FWHM10.6°のガウスビームで励振)を示す。従来法と比べ、本手法は短波長域での損失の増加を抑制できている。レーザダイオード(LD)の発振波長650nm付近では、スペクトル上で損失は約3dB低減した。従来法で製作した高強度銀中空ファイバは、銀鏡反応時間9minで製作しており、RMS値は26nmであった。新手法で製作した高強度銀中空ファイバのRMS値は、高強度先端部で10nm、低損失伝送部で7nmであった。

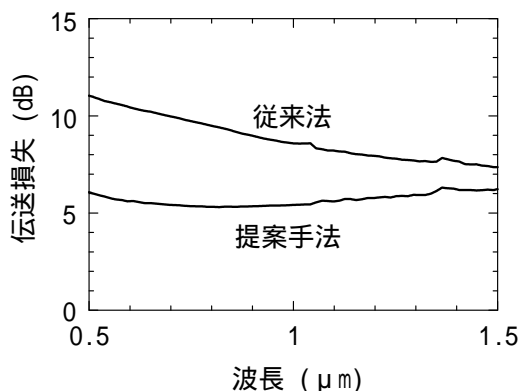


図4 高強度銀中空ファイバの波長損失特性

Ag/ZPP1/buffer中空ファイバを製作することに成功したので、この銀の内面に当該波長で適当な膜厚を有するポリマー膜を成膜する。最も単純な方法は、保護膜と同じ無機膜を用いることである。しかしながら、同じ無機溶液を用いると、Ag膜下にある保護膜が溶解するという現象がしばしばみられた。それゆえ、内装低損失化ポリマーとして、環状オレフィンポリマーのCOPを用いる。

波長2.94 μmのEr:YAGレーザ光を伝送する、内径0.7mmの高強度中空ファイバの製作を行う。COPの膜厚を約0.36 μmとするために、濃度8 wt%のCOPを10 cm/minの速度で送液した後、窒素雰囲気中の室温で、30分の乾燥を行った。

図5にCOP/Ag/ZPP1/buffer中空ファイバの可視波長帯での損失スペクトルを示す。本手法で製作した高強度中空ファイバは、明確な干渉ピークが見られることから、均一なCOP膜を成膜できた。COP膜の膜厚は、約0.36 μmである。従来法と比べ、本手法は短波長域での損失を低減できている。レーザダイオード(LD)の発振波長650nm付近では、スペクトル上で損失は約4.9dB低減した。

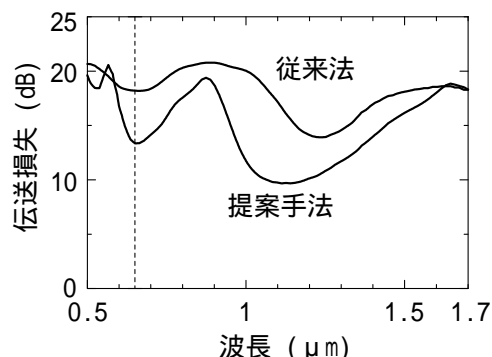


図5 COP内装銀高強度中空ファイバの波長損失特性

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13.2 mJ)と発振波長650 nmのLDを用い、提案する無機保護膜つきCOP内装銀中空ファイバの曲げ状態時の伝送特性を評価した。測定系を図6に示す。焦点距離48 mmのCaF₂レンズで集光したEr:YAGレーザ光を結合ファイバ(内径0.7 mm、長さ10 cmの銀中空ファイバ)を通して、内径700 μm、長さ1.2 mのCOP/Ag/ZPP1/buffer中空ファイバに入射する。中空ファイバの出射端を曲げ半径15 mmで曲げ、伝送特性を評価した。測定結果を図7に示す。

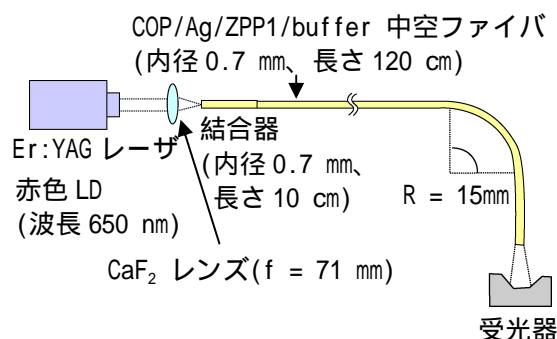


図6 Er:YAGレーザ光と赤色LD(波長650 nm)の伝送特性の測定系

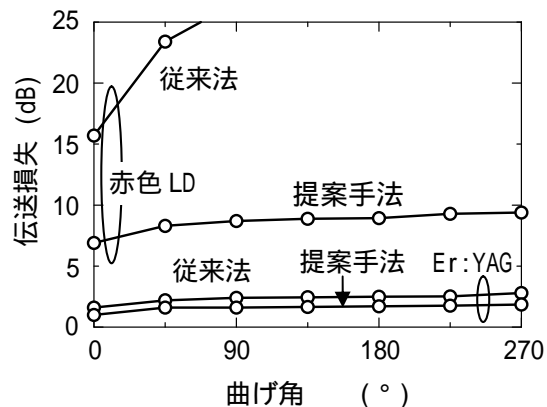


図7 COP内装銀高強度中空ファイバのEr:YAGレーザ光と赤色LD光の曲げ伝送特性

Er:YAG レーザ光の伝送特性は、直線状態で約 1 dB、曲げ半径 15 mm で 270° 曲げた状態で約 1.9 dB であった。本手法で製作した高強度中空ファイバの LD 伝送特性は、直線状態で約 6.9 dB、曲げ半径 15 mm で 270° 曲げた状態で約 9.4 dB となり、従来法と比べて伝送損失を低減することができた。曲げ半径 15 mm、曲げ角 270° の状態を 30 分間保ち、その後、Er:YAG レーザ光伝送特性を測定した。高強度中空ファイバは折れることなく、曲げる前と同程度に低損失であった。高強度先端部一体型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うことができ、また外径が太いため、高出力赤外レーザ光伝送に威力を発揮すると思われる。また Er:YAG レーザ光を用いるため、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、可視光 ~ Er:YAG レーザ光を低損失に伝送できる、環状オレフィンポリマー (COP) 膜内装銀中空ファイバを用いることから、可視光と Er:YAG レーザ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て大きな貢献を果たしうる。

中空ファイバ製作法は単純で低コスト化が可能である。現在ある充実型赤外送送路に対して、本研究で提案する高強度先端部一体型中空ファイバは、機能性、価格、取り扱い易さの上で極めて優位に立つ伝送路である。よって、本研究の Er:YAG レーザ光伝送可能な高機能中空ファイバは、高出力赤外レーザ光を安全かつフレキシブルに高効率伝送でき、体に全く傷をつけない無侵襲治療という卓越した成果が期待できるとと思われる。

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 7 件)

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, 電気学会研究会資料 光・量子デバイス研究会, 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

関 淳, 岩井 克全, 片桐 崇史, 松浦 祐司, 光ファイバ型音響センサを用いた全光学式光音響イメージングプローブの開発, 東北大学電気通信研究所工学研究会 第 579 回伝送工学研究会, 査読無, Vol. 2015, No. 579-3, pp. 1-4

K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, Silver hollow optical fibers with acrylic silicone resin coating as buffer layer for sturdy structure, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 9702, 2016, pp. 1-8

DOI:10.1117/12.2208314

A. Seki, K. Iwai, T. Katagiri, and Y. Matsuura, Photoacoustic imaging by using a bundle of thin hollow-optical fibers, Proc. SPIE, 査読有, Vol. 9702, 2016, pp. 1-8

DOI:10.1117/12.2209000

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, 査読有, Vol. 9317, 2015, pp. 1-8

DOI: 10.1117/12.2076337

[学会発表](計 2 2 件)

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 IEEE 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 6th Asia Pacific 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 μm 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)

関 淳、岩井 克全、片桐 崇史、松浦 祐司、光ファイバ型音響センサを用いた全光学式光音響イメージングプローブの開発、東北大学電気通信研究所工学研究会 第 579 回伝送工学研究会、2016 年 2 月 23 日、東北大学 (宮城県・仙台市)

K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, Silver hollow optical fibers with acrylic silicone resin coating as buffer layer for sturdy structure, Photonics West 2016, 2016. 2. 14, The Moscone Center San Francisco, California (USA)

A. Seki, K. Iwai, T. Katagiri, and Y. Matsuura, Photoacoustic imaging by using a bundle of thin hollow-optical fibers, Photonics West 2016, 2016. 2. 13, The Moscone Center San Francisco, California (USA)

岩井 克全、高橋 溪太、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先端素子の製作、レーザー学会学術講演会第 36 回年次大会、2016 年 1 月 10 日、名城大学天白キャンパス (愛知県・名古屋)

関 淳、岩井 克全、片桐 崇史、松浦 祐司、内視鏡下音響イメージング用光ファイバプローブ - 超細径中空光ファイバによる高解像度化の検討 -、光・量子デバイス研究会、2015 年 9 月 28 日、東北大学東京分室 (東京)

岩井 克全、高橋 駿太、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、2015 年 9 月 8 日、東北大学 (宮城県・仙台市)

穴澤 諒弥、岩井 克全、高久 裕之、宮城 光信、石 芸尉、極細径中空ファイバ用シーリングキャップ、平成 27 年度電気関係学会東北支部連合大会、2015 年 8 月 27 日、岩手県立大学 (岩手県・滝沢市)

A. Seki, K. Iwai, Y. Matsuura, Photoacoustic imaging system with

ultra-thin hollow optical fibers, 5th Asian and pacific-rim symposium on biophotonics (APBP '15), 2015. 4. 22-24, Pacifico Yokohama (Kanagawa・Yokohama)

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, 2015. 3. 2-4, Tohoku University (Miyagi・Sendai)

K. Iwai, H. Takaku, M. Miyagi, Y. W. Shi, and Y. Matsuura, Improvement of transmission properties for a rugged polymer-coated silver hollow fiber, Photonics West 2015, 2015. 2. 7, The Moscone Center San Francisco, California (USA)

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、2015 年 1 月 12 日、東海大学高輪校舎 (東京)

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、2015 年 1 月 12 日、東海大学高輪校舎 (東京)

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、2014 年 9 月 24 日、徳島大学 (徳島県・徳島市)

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 無機保護膜の成膜条件、平成 26 年度電気関係学会東北支部連合大会、2014 年 8 月 22 日、山形大学 (山形県・米沢市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高久 裕之 (TAKAKU, Hiroyuki)
仙台高等専門学校・総合工学科・研究員
研究者番号：20705016

(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：10361130

(3) 研究協力者

宮城 光信 (MIYAGI, Mitsunobu)