

赤外光ファイバと内視鏡レーザメス

松下電器産業(株)電子機器基礎研究所

荻嶋 一弘

デバイス工法開発研究所

杉浦 久則

Infrared optical fiber and laser endoscope

Kazuhiro Kayashima

Intelligent Electronics Lab., Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

Hisanori Sugiura

Device Process Technology Research Lab.,

Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.

1. はじめに

現在、光通信、計測用として実用化されている石英光ファイバの伝送波長域は、可視光から2 μm 程度の近赤外までである。これに対して、さらに長い波長の赤外光を伝送する光ファイバとして赤外光ファイバが注目されている。赤外光ファイバは、理論的損失が石英系光ファイバと比べて2桁近く低いと、当初は、石英ファイバに代わる長距離伝送用光ファイバとして開発が進められた。

一方で、温度計測などの赤外線計測分野への応用、 CO_2 レーザを初めとする高パワーレーザ光の伝送など、広範な応用展開が期待されている。

CO_2 レーザは、工業分野・医療分野において活発に应用が進められているが、その発振波長(10.6 μm)が中赤外域にあるため、石英ファイバでは伝送することができない。従って CO_2 レーザ光を高パワーで伝送できるファイバが得られれば、大きく応用展開が可能となる。

各種赤外光ファイバの伝送波長域と主要なレーザの発振波長を Fig. 1 に示す。 CO_2 レーザ光を伝送可能な光ファイバとして、中空ファイバ¹⁾、ハライド結晶ファイバ^{2)~12)}、カルコゲナイドガラスフ

ァイバがあるが、この中で、パワー伝送能力、柔軟性を考慮した場合、ハライド結晶ファイバが最も適していると考えられる。本稿では、ハライド結晶ファイバの特性と、内視鏡用レーザメスへの応用を中心とした用途展開について述べる。

2. ハライド結晶ファイバ

2.1 ファイバ材料と成形方法

Table 1 にファイバとして用いられる主なハライド結晶材料とその特性を示す。これらの中で、比較的安定で高パワー伝送に適している TlBr-TlI ファイバ^{2)~7)}、柔軟性に優れるハロゲン化銀

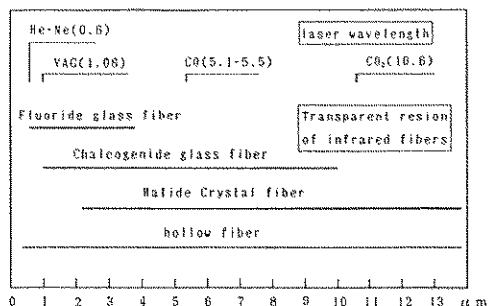


Fig. 1 Transparent region of infrared fibers and laser wavelength.

Table 1 Characteristics of infrared light transparent materials.

Material	transparent resion [μm]	index [10.6 μm]	Hardness [knoop]	solubility [g/100 gH ₂ O]	melting point [$^{\circ}\text{C}$]
KCl	0.2 ~30	1.45	9.3	35	776
CsBr	0.2 ~40	1.64	20	124	636
AgCl	0.4 ~28	1.98	9.5	1.5×10^{-4}	455
AgBr	0.45~35	2.17		1.2×10^{-5}	434
TlBr	0.4 ~48	2.34	12	5×10^{-2}	460
KRS-5 (TlBr-TlI)	0.5 ~40	2.37	40	2×10^{-2}	415

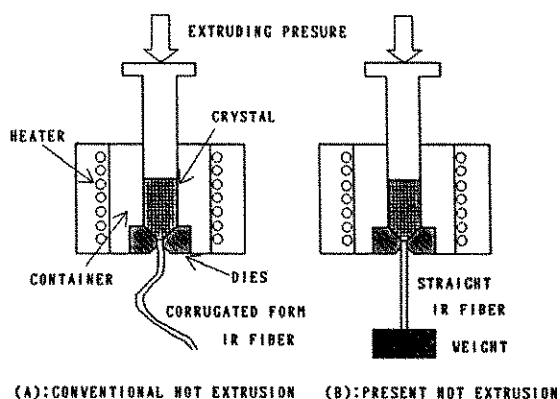


Fig. 2 Schematic view of a conventional extruder and an extruder in this work.

ファイバ^{8)~12)}の研究が進んでいる。

ハライド結晶ファイバは、通常温間押し法により成形される²⁾(Fig. 2)。これは、プリフォーム結晶を、その融点以下の温度に加熱し、圧力を加えてダイス穴径のファイバを押し出すものである。通常、プリフォームとして単結晶を用いるが、押し出し工程で多結晶化する。このため、多結晶粒界による散乱、成形後の残留歪による散乱などがあるといわれている³⁾。一般的な光ファイバの構造はコア・クラッド構造であるが、ハライド結晶ファイバの場合、温間押し法を用いてコア・クラッド構造とすることが困難であること、エネルギー伝送を目的とするため、伝送効率が重視され、コアとクラッドの屈折率差が大きいほうが好ましいこと、などの理由によりクラッドをつけない構

造、すなわちルーズクラッド（エアクラッド）構造を採用している。

2.2 TlBr-TlI ファイバ

TlBr-TlI (KRS-5) ファイバは、現時点では最も高い CO₂ レーザパワーを伝送できるファイバで、実験室レベルでは直径 0.5 mm・長さ 1.5 m で 250 W のレーザパワー伝送に成功している⁴⁾。パワー伝送能力に最も影響を与えるのは、ファイバ中に含まれる微少な異物であり、ファイバ全体の伝送効率がよい場合でも、局所的に異物が存在する場合、この異物がレーザ光を吸収して温度が上昇し、最終的にはファイバ自体が焼損してしまう。従って、パワー伝送能力を向上するには、原料の単結晶製作、およびファイバ成形時に異物粒子が混入しないように細心の注意が必要である。

屈曲特性については、直径 0.5 mm のファイバで限界曲率半径 4 cm, 実用的には 15 cm 以上の曲率で使用可能である⁹⁾。

KRS-5 ファイバを SUS チューブに収納し、水冷することにより、300 W の CO₂ レーザ伝送が報告されている⁹⁾。この際、ファイバ端面での散乱光の吸収による、保持部の発熱による損傷を防ぐため、ファイバ端部は赤外透過材料である NaCl で保持されている (Fig. 3)。この光ケーブルを用いた CO₂ レーザ照射 (パルス照射, ピーク出力 200 W・デューティ 1:1) により、板厚 0.5 mm の鉄板を 1 mm/sec のスピードで切断できることが確認されている。

さらに、KRS-5 ファイバの外科用レーザーメスへの応用が試みられている^{4),7)}。ここでは、ファイバの両端面に 3 層構造 (As₂Se₃/KCl/As₂Se₃) の反射防止膜が取り付けられており、実効伝送効率は 93%/1.5 m である。ケーブルは、曲率制限機構により、半径 15 cm 以下に曲がらない構造になっており、ガイド光として 2 本の石英ファイバにより導かれた He-Ne レーザ光が使用されている。(Fig. 4) レーザ発振管には封じ切り型レーザー管が用いられ、最大出力は 30 W である。

2.3 ハロゲン化銀ファイバ

ハロゲン化銀ファイバは、主に AgCl-AgBr 材料を用いて、様々な組成比で検討されており⁸⁾⁻¹²⁾、AgBr に AgCl を 2% 添加したもの⁸⁾、AgCl と AgBr を等モル比にしたもの¹²⁾などが報告されている。AgCl-AgBr ファイバは、パワー伝送能力では KRS-5 ファイバには及ばないが、機械強度が高いために屈曲特性がよい、水に不溶で

ある、生体に対して影響が少ない、という特徴がある。組成比 AgCl_{0.5}Br_{0.5} の材料を用いて、適当な押出し条件でファイバ化することにより、20 mm の曲率半径で、5000 回の繰り返し曲げに耐えることが確認されている¹³⁾。

3. 内視鏡レーザーメス

治療を要する患部が体表または体表に近いところにある場合には、直接患部の治療ができるが、体内深部の場合には、やむをえず健全な部分に切開等の手を加えざるを得ないことが多い。患部のみを治療する非侵襲的治療は究極の目標であり、消化器系などでは、内視鏡の普及とあいまって、着実に進んでいる。レーザーによる非侵襲的治療はレーザーの出現以来の関心事で、既に Ar レーザによる網膜剥離治療などが実現されている。CO₂ レーザの場合には、その切開能・蒸散能から、内視鏡的治療の有用性が期待されながらも、光ファイバが使えないために、従来は、体表から行う外科的治療が主であった¹³⁾。

この項では、内視鏡的レーザー手術に適用可能な赤外光ファイバ¹²⁾と、これを用いた内視鏡レーザーメス¹⁴⁾に対する我々の取り組みについて述べる。

3.1 塩化銀-臭化銀光ファイバ¹²⁾

光ファイバを内視鏡的レーザー手術に用いる場合には、内視鏡のスペックを考慮すると、レーザーを体腔内に導く光ファイバには、以下の特性が必要と考えられる。

- (1) 半径 20 mm で 1000 回以上の繰り返し曲げに耐える柔軟性。
(消化気管内視鏡の限界曲率半径は 20 mm)
- (2) 出力 10 W 以上のレーザー伝送能力等の良好な光学特性。

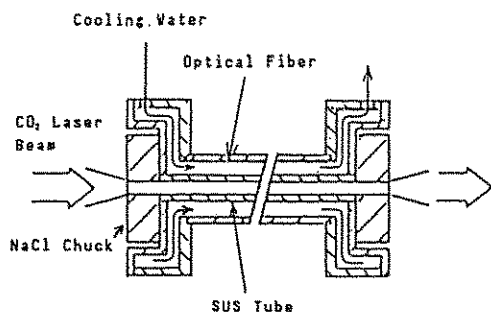


Fig. 3 Cable for High Power Laser Transmission.

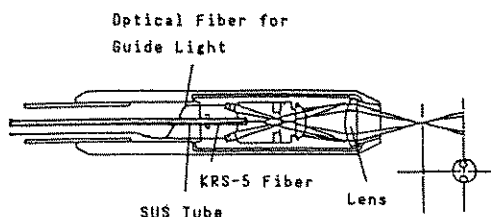


Fig. 4 Cable for Laser Surgery.

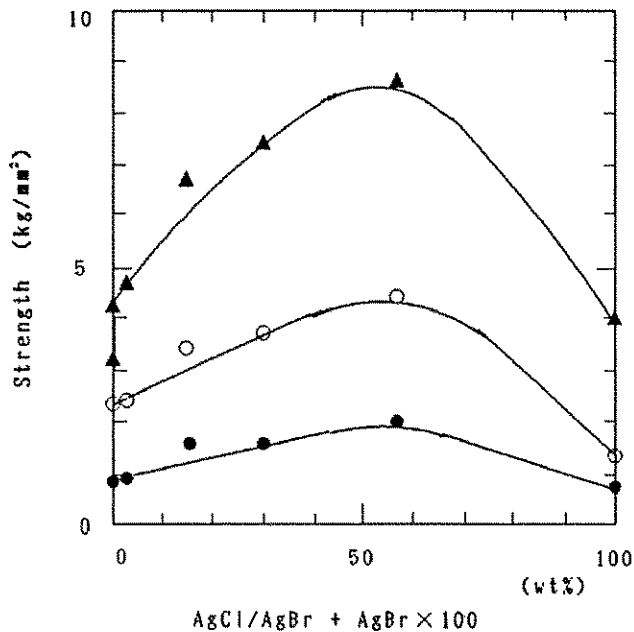


Fig. 5 Yield strength (●) and tensile strength (○) of AgCl-AgBr single crystal and tensile strength (▲) of AgCl-AgBr fiber with respect to the concentration of silver bromide.

(3) 生体に対して影響がない材料であること。
以上の観点から、光ファイバの材料として塩化銀-臭化銀材料を選んだ。

3. 1. 1 柔軟性の向上

光ファイバを曲げた時に生じる歪による応力 σ は光ファイバの最外周で最大となる。

$$\sigma_{\max} = E \cdot a / 2R \quad (1)$$

但し、 E はヤング率、 R は曲げ半径、 a は光ファイバの直径である。すなわち、光ファイバの柔軟性を高めるには、材料の降伏強さを大きくし、光ファイバ直径 a を小さくすれば良い。そこで、光ファイバの製作方法に着目し、機械強度向上と光ファイバの細径化の取り組みを行った。

3. 1. 2 機械強度の向上

Fig. 5 に示すように、塩化銀-臭化銀材料の機械強度は、中央の組成比ほど高い⁹⁾。すなわち、 $\text{AgCl}_{0.5}\text{Br}_{0.5}$ を選ぶと降伏強さは AgCl または AgBr のみの単体結晶に比べて約 2 倍となるが、これだけでは十分といえない。更に、光ファイバの押出し条件と光ファイバの機械強度との関係を

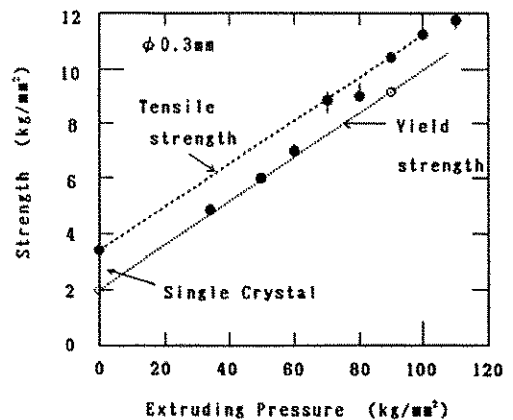


Fig. 6 Mechanical strength of AgCl-AgBr fiber as a function of extruding pressure.
● : Experimental results of tensile strength
○ : Experimental results of yield strength

調べ、機械強度向上の検討を行った。

押出し圧力と光ファイバの引張強さ・降伏強さには正比例の関係が見られ (Fig. 6)、ダイスの強

度限界である 120 kg/mm^2 の押出し圧力では、結晶単体の強度に比べて4倍も引張強さの高い光ファイバを得ることができる。この原因として、押出し圧力を上げると光ファイバの結晶粒径が微細化したため (Fig. 7), 光ファイバの引張強さ・降伏強さ等の機械強度が高くなった事が考えられる。

3.1.3 細径化

従来の温間押出し成形方式で光ファイバの細径化を行なうと、押出し速度の低下や光ファイバの湾曲等の問題が生じる。これは、光ファイバの成形に用いるダイス孔が細径である為に孔加工が難しく、理想的な孔形状のダイスが得られないためである。これを解決するために、強制的に光ファイバが真っ直ぐになるように張力付加して押出す張力付加押出し方式を考案し実施した。付加した加重は、直径 0.3 mm の光ファイバでは、 $100 \sim 350 \text{ g}$ 程度である。(Fig. 2(b)) この張力付加押出し方式により、直径 0.3 mm と細径で真っ直ぐな光ファイバを得る事ができる。

3.1.4 光ファイバの柔軟性

光ファイバの柔軟性を評価するために、繰返し曲げ測定を行った。測定は、自然放熱下で、 20 W のレーザー光を入射しながら、光ファイバの中央部をいろいろな半径の円盤に沿わせて 180 度曲げ

を加え、屈曲箇所ではレーザー光により溶けて焼損するまでの屈曲回数を求めるものである。

Fig. 8 は直径の違う光ファイバにおける屈曲半径と耐屈曲回数との関係、Fig. 9 は光ファイバの押出し条件と屈曲回数の関係を示す。(1)式から予測されるように、屈曲半径 R が大きく、光ファイバ直径 a が小さく、更に機械強度が高い(押出し圧力が高い)ほど、耐屈曲回数が多くなる結果を示した。光ファイバの実使用条件である屈曲半径 20 mm では、直径 0.3 mm の光ファイバで、 5000 回の繰返し曲げが可能であり、内視鏡下手術での使用条件を十分満たしていると言える。更に、屈曲半径 5 mm でも 100 回程度の繰返し曲げに耐えるので、より柔軟性が要求される冠動脈内レーザー手術に対しても適用が可能であると考えられる。

3.1.5 押出し圧力と光学特性の関係

押出し圧力の光学特性(吸収損失、散乱損失、出射角度)への影響について調べた。但し、出射角度は出射エネルギーを 90% 含む角度であり¹⁵⁾、散乱損失は透過率測定によって求められた全損失からカロリメトリ法¹⁶⁾により求められた吸収損失を差し引いたものである。

高圧力押出 ($> 70 \text{ kg/mm}^2$) の光ファイバは、全損失は 10% 以内、出射角度は 15 度以内と、機械

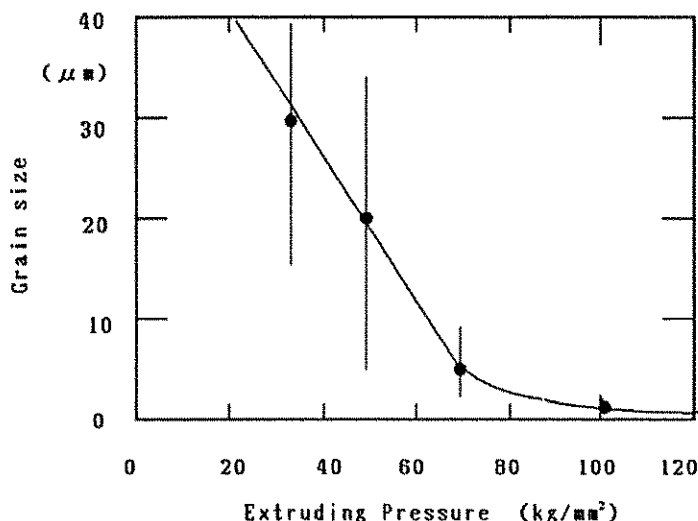


Fig. 7 The Grain size of fiber as function of extruding pressure.

特性と同様に光学特性が優れている。ところが、押し出し圧力を低くすると、吸収損失、散乱損失、

出射角度ともに低下する。これは、Fig.10 において散乱損失（黒丸）の増大の傾向が見られ、低圧

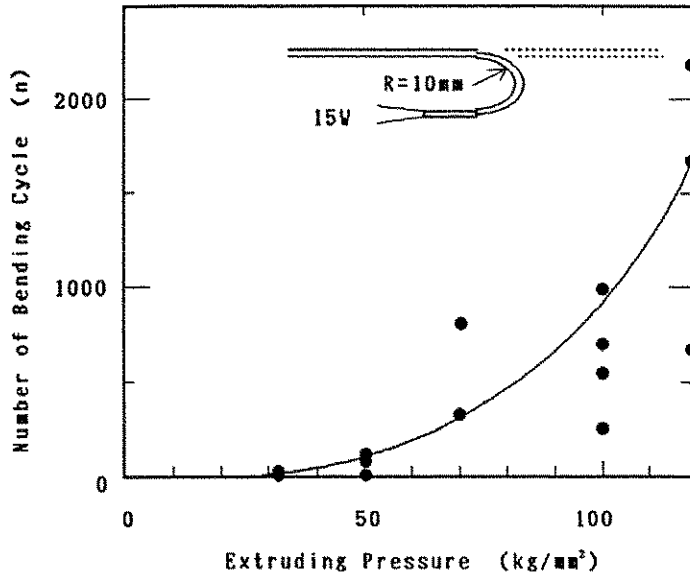


Fig. 8 Endurance capability of the fiber emitting 20W laser against repeated flexing with varied radius of curvature.
● : $\phi 0.3\text{mm}$ fiber ○ : $\phi 0.5\text{mm}$ fiber

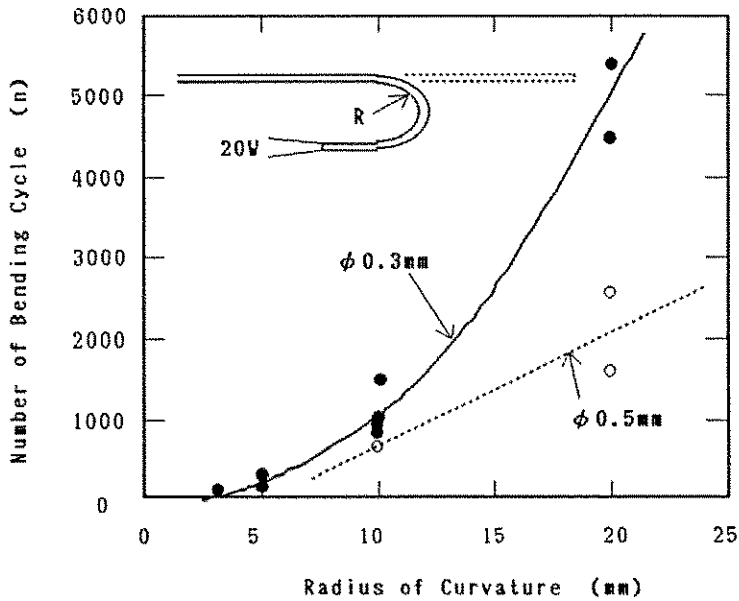


Fig. 9 Endurance capability of the fiber emitting 15W laser against repeated flexing of 10mm radius with varied extruding pressure.

力押しによる光ファイバの透過率の低下や出射角度の増大 (Fig. 11) は散乱要因が引き金になって生じるものと考えられる。

3.1.6 光学特性と伝送能力

光ファイバの基本特性を Table. 2 に示す。

伝送能力測定は、自然放熱の条件下で、光ファ

イバ (直径 0.3 mm, 長さ 1.5 m) に、5 分間隔で 10 W ずつ増加するレーザ光を入射し、光ファイバが溶けて焼損するまで実験を行うものである。今回の実験では、100 W 入力後約 1 分で出射端で焼損した。この実験から、光ファイバは、最大レーザ入力 90 W, 出力 65 W (90 kW/mm²) と非常

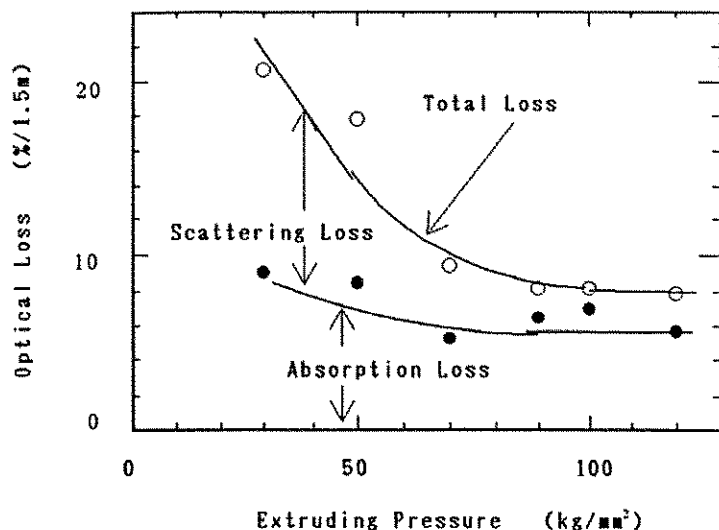


Fig. 10 Extruding pressure vs. three kinds of optical losses. The total loss (○) is calculated from transmittance and the scattering loss is equal to the total loss minus the absorption loss (●).

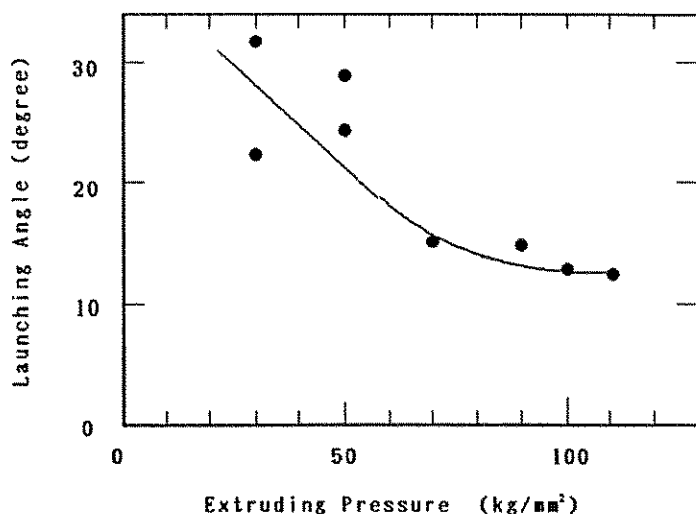


Fig. 11 Extruding pressure vs. launching angle.

に高いレーザー光の伝送能力を有する事がわかる。
(Fig. 12)

3.2 内視鏡レーザーメスについて¹⁴⁾

内視鏡は大別して胃カメラで代表される軟性鏡と金属性棒状の硬性鏡とがある。軟性鏡も、胃、気管支、耳鼻用など用途に応じて多種類のものが使われ、ますます細いものが実用化されてきている。

ここでは胃カメラへの適用を目的としたプローブについて述べる。このプローブは胃カメラ内に設

けられている鉗子口に挿入して用いることを前提とし (Photo. 1), 下記に示すような条件を満足しなければならない。

太さ : 鉗子口 ($\phi 2.8$) に挿入可能な事。

挿入性 : 適度な剛性を有する事。

屈曲性 : 胃カメラ先端の屈曲性に適合する事。

パワー : 連続 10 w の照射が可能である事。

ビーム : ビーム広がり角度が小さい事。

その他 : 使用できる材料、滅菌への対策など。
プローブ先端の既略を Fig. 13 に示す。

Table 2 Optical features of fibers (N=43) extruded in the same condition. (pressure=120 kg/mm², length=1.5 m, diameter= $\phi 0.3$ mm)

	Transmittance (%/1.5 m)	Absorption loss (%/1.5 m)	Emitting angle (degree)
average	70.0	5.8	15.4
deviation	1.8	1.6	1.1
Max.	73.5	11.5	13
Min.	64.7	2.9	18

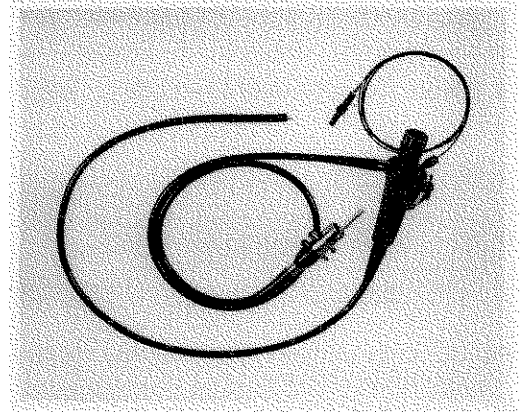


Photo. 1 Endoscope and Optical Probe

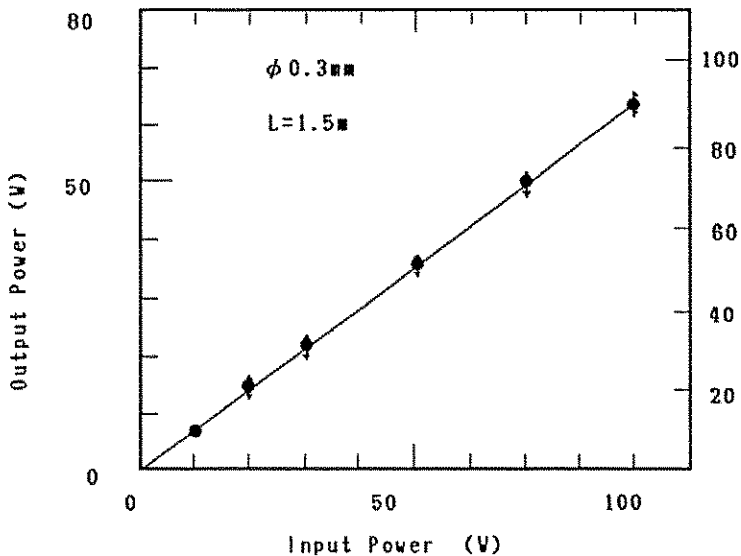


Fig. 12 Power transmission output capability for CO₂ laser.

プローブの全長は2.5 m, 直径は $\phi 2.3$ mmである。これは上記条件をほぼ満足している。

内視鏡レーザメスを Photo. 2 に示す。本装置によって早期胃癌などの臨床テストを行い、その切開能・蒸散能等の良好な結果を得る事ができた。

現状では、CO₂レーザによる内視鏡的治療はようやく開始できる一つの条件をクリアした段階であり、今後、治療のニーズに応じた各種プローブを開発する必要があると考える。

4. まとめ

以上、赤外光ファイバに対する松下電器の取り組みを主に説明し、赤外光ファイバが実用レベルまで到達してきた事が理解されたと思う。最近で



Fig. 13 Cross-sectional View showing Optical Probe.

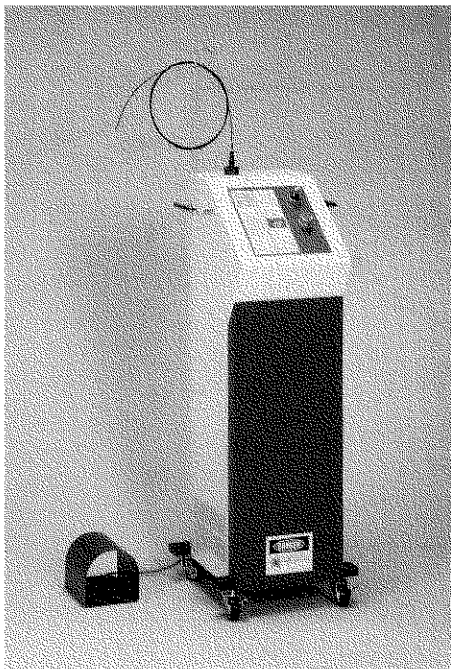


Photo. 2 Laser Endoscope System

は、我々以外にも、Artjuschenko 等がドイツから実際に塩化銀-臭化銀光ファイバを販売しているという話を聞く。このように赤外光ファイバが医学用、更に工業用にこれから発展していく兆しが見えてきた。更なる赤外光ファイバの応用展開と、光ファイバ材料の発展を期待したいし、我々も発展に貢献したい。

参考文献

- 1) M. Miyagi et al : Opt Commum, **61**, No. 3, p. 229-232 (1987)
- 2) D. A. Pinnow, A. L. Gentile, A. G. Standlee, A. Timper : Appl. Phys. Lett., **33**, p. 28, (1978)
- 3) J. A. Harrington and A. G. Standlee : Appl. Opt., **22**, 3073 (1983)
- 4) 杉浦久則, 渡正文, 中農裕美, 池戸才 : 第36回春季応用物理学関係連合講演会予稿集, p. 932 (1989)
- 5) M. Ikedo, M. Watari, F. Tateishi, H. Ishiwatari : J. Appl. Phys., **60**, p. 3035-3039 (1986)
- 6) 福井忠弘, 萱嶋一弘, 立石文和 : 第34回春季応用物理学関係連合講演会講演予稿集, p. 600 (1987)
- 7) H. Ishiwatari, M. Ikedo, F. Tateishi : J. Lightwave Techn., **LT-4**, NO. 8, pp. 1273-1279. (1986)
- 8) 高橋謙一, 葭田典之, 山内一寿 : 住友電気, No. 128, p. 123-130 (1988)
- 9) A. Sa'ar, N. Bartkay, F. Moser, I. Schnitzer, A. Levite, A. Katzir : Proc. Spie-Int. Soc. Opt. Eng. (USA), **843**, pp. 98-104 (1988)
- 10) 柳澤栄治, 伊勢田徹, 後藤光雄, 竹内純一, 朝来野邦弘 : 旭硝子研究報告, **35**, No. 2, p. 219-232 (1986)
- 11) V. G. Artjushenko, L. N. Butvina, E. M. Dianov, J. G. Kolenskinov, V. V. Vojtsekhovsky : Proc. Spie-Int. Opt. Eng (USA), **843**, p. 155-160 (1988)
- 12) 萱嶋一弘, 大島希代子, 立石文和, 菅田文雄 :

応用物理 59, No. 12, p. 1674-1680 (1990)

- 13) 法規 昭, 他: 日本レーザー医学会誌, 8, No. 4, p. 25-26 (1988)
- 14) 石渡裕政, 遊津隆義, 林 義明, 菅田文雄: 赤外線技術研究会資料, No. 2111 (1990)
- 15) 中原信一, 他: 第 30 回春季応用物理学関係連合講演会講演予稿集, p. 83 (1983)
- 16) 石渡裕政: 通信学会, 光エレ研究会, OQE83-53, (1985)
- 17) 萱嶋一弘, 立石文和: 医用電子と生体工学, 27 特別号 (1989)
- 18) 立石文和, 萱嶋一弘: 平成元年レーザ学会学術講演会第 9 回年次大会, 26V4, p. 240 (1989)

[筆者紹介]



萱嶋 一弘 (かやしま かずひろ)

昭和56年 九州大学大学院工学研究科修士過程修了 (応用原子核工学)

同 年 松下電器産業(株)入社, 赤外光ファイバの計測と材料の研究に従事

現 在 同社電子機器基礎研究所に所属, 日本 ME 学会, 応用物理学会, 電子情報通信学会会員

[筆者紹介]



杉浦 久則 (すぎaura ひさのり)

昭和62年 大阪大学大学院工学研究科修士過程修了 (プロセス工学),

同 年 松下電器産業(株)入社, 赤外光ファイバの材料の研究に従事,

現 在 同社デバイス工法開発研究所に所属, 応用物理学会会員

[連絡先]

〒 570 大阪府守口市八雲中町 3-15

松下電器産業株式会社中央研究所

電子機器基礎研究所

TEL 06-906-2409

Abstract

Recent investigation on halide crystal infrared fibers for a CO₂ laser transmission are reviewed. These fibers are fabricated by a hot extrusion method. The TlBr-TlI (KRS-5) fiber is most suitable for high power laser transmission. The fiber (0.5mm in diameter and 1.5m in length) can deliver a 300W laser beam which can cut a steel plate 0.5mm in thickness when cooled by water. The AgCl-AgBr fiber (0.3-0.5mm in diameter and 1.5-2.5m in length), has high flexibility with radius less than 20mm, low solubility, and no toxicity, so can be applied to laser surgery with an endoscope. To achieve this high flexibility, the diameter was decreased and the strength was increased with a new hot extrusion method.