医療用 CO_2 レーザの中空ファイバ導光システムと周辺装置の開発

本間　正士*　　大川　斉*　　丸山　英彰**　　長谷川　雅人**　　中川　昌幸**

Development of the CO_2 laser light delivery system using the hollow fiber and peripheral equipments for medical treatments

HONMA Seishi*,　OHKAWA Hitoshi*,
MARUYAMA Hideaki**,　HASEGAWA Masato**　and　NAKAGAWA Masayuki**

抄　　録

医療用 CO_2 レーザ装置において、多関節ミラーによる CO_2 レーザ導光路に代わり、中空ファイバによる導光路を適用することによって、製品の高付加価値化を図ることを目指して研究を行った。中空ファイバによる CO_2 レーザの伝送特性を明らかにするため、CO_2 レーザの中空ファイバへの入射条件、ファイバ長さ、曲げによる伝送損失を測定した。その結果、ファイバ曲げによる損失を、曲げ半径、曲げ角度をパラメータとして数式化した。また、治療を行う際に医師が操作するアタッチメントの光学系について集光特性を調べた。さらに、実用化のうえで非常に重要な問題となる安全対策に対応するため、赤外線センサを用いた中空ファイバの折れ検出方法について検討した。

１．　緒　　言

医療に使用されるレーザ光源は、その適用対象によって最適な波長が選択されている。現在、多く使用されているものとして、ルビー、アルゴン、YAG、CO_2 などがある。CO_2 レーザは波長が 10.6μm の赤外光で、水に対する吸収率が非常に高く皮膚等への照射における低侵襲性や、レーザメスで知られる止血効果など優れた特徴を持ち医療分野に広い適用範囲をもっている。

現在、様々な医療用レーザ装置が実用化されているが、その操作性、メンテナンス性、コスト面での優位性から、YAG レーザ、半導体レーザ等では導光路として光ファイバを用いるものが主流となってきている。しかし、CO_2 レーザは石英に対する吸収率が非常に高いため、石英コアの光ファイバで導光することができず、多関節ミラーの反射を利用した導光路を用いた装置(図 1)が依然広く使われている。

一方、石英ファイバで導光出来なかったレーザに適用できるファイバとしてコアが中空の中空ファイバが開発された。これは、ガラスキャピラリーチューブの内面に銀鏡反応により銀皮膜を形成したものであり、その表面での反射により光を伝送するものである。この中空ファイバでは、コアの材質による吸収損失がほとんどなく、入射端面でのフレネル損失も起こらない。しかし、コアの屈折率がクラッドよりも低いため、石英ファイバにおける全反射による伝送と異なりファイバ内径面で損失を伴う伝送となる。

* 株式会社ニーク新潟研究所
**研究開発センター

ここで、コア･クラッド境界における反射率を高めること、つまりファイバ内径面での反射率を向上させることにより高効率な伝送が可能になっている。

この中空ファイバの CO_2 レーザ伝送特性は、東北大学宮城教授、松浦助教授らの過去の研究[1)、2)]で検討がなされており、実用上問題ないレベルの伝送効率を示している。しかし、中空ファイバによるレーザ光の伝送では、コア・クラッド界面における全反射を利用した石英ファイバに比べ損失が大きく、その特性について実験的に詳細に検討した報告がなかった。

以上の点から、本研究では、医療用 CO_2 レーザ装置に中空ファイバを適用するための基礎データとして中空ファイバの伝送特性を実験的に調べ、併せて周辺装置の開発と安全対策の問題について検討した。

図１　従来の多関節ミラー導光による医療用 CO_2 レーザ装置

２．実験装置及び実験方法

２．１　中空ファイバ

本研究で用いた中空ファイバは日立伸材㈱製で、ガラスチューブの内面に銀鏡反応により平滑な銀皮膜を形成したものである。さらにその銀皮膜の内面には誘電体皮膜が形成され、ファイバ内面における反射率を高めている。中空ファイバの構造概略図を図２に示す。本研究では、内径φ0.7mm のファイバを使用した。

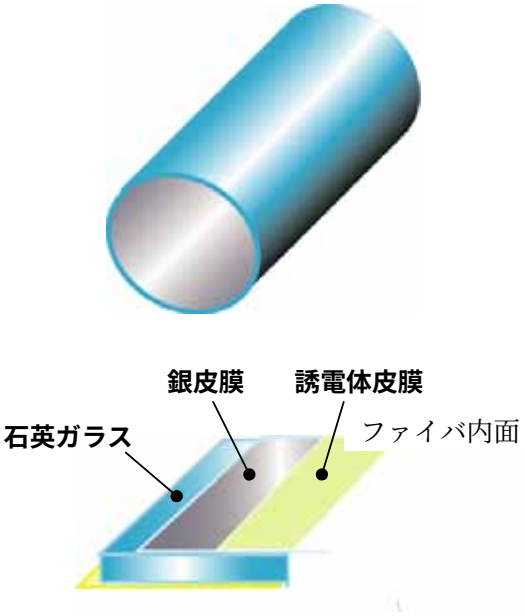

図２　中空ファイバ概略図

２．２　実験方法

２．２．１　中空ファイバ伝送特性の測定

レーザ発振器より出射した CO_2 レーザを ZnSe 平凸レンズにより集光し、中空ファイバに入射させた。集光レンズは焦点距離の異なる f50、f100 の２種類のレンズを使用し、ファイバへの入射光を変えて伝送損失の変化を調べた。中空ファイバの長さは 0.1m、2m の２種類を使用し、入射時の損失、単位長さ当たりの伝送損失の測定を行った。また、中空ファイバの曲げによる損失は図３のように曲げ半径、曲げ角度をパラメータとして、ストレートの状態を損失 0dB として求めた。

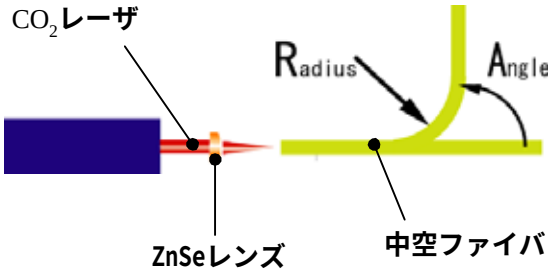

図３　実験の概略図

２．２．２　中空ファイバから出射した CO_2 レーザの集光特性

中空ファイバ出射後のレーザはハンドピースと呼ばれるペン型で内部に光学系をもつアタッチメントにより集光される。ハンドピースは医師がペンのように容易に操作できるよう、使いやすいサイズでなければならない。そこで、ファイバ出射端から焦点位置までが 150mm 程度に収まるような光学系を光学ソフトによるレンズ配置を基に検討した。2 枚の f50 平凸レンズを用い、レンズ間距離を 5mm に固定し、ファイバ出射端からレンズ入射までの距離を変化させたときのバックフォーカス、集光スポット半径を測定した。図 4 にファイバ出射端の光学系の概略図を示す。

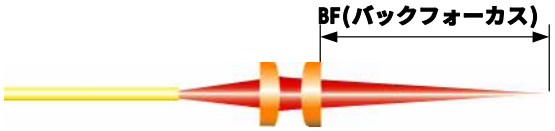

図 4　中空ファイバ出射端と集光レンズの構成

２．２．３　中空ファイバ折れ検出方法の検討

中空ファイバが破損し、不可視光である CO_2 レーザが漏れることは非常に危険である。製品の安全性確保のために、ファイバの破損を速やかに検出し、レーザの照射を停止するなどの安全機構を設けなければならない。本研究では、ファイバ出射端における集光レンズ表面で反射・散乱する CO_2 レーザを赤外線センサであるサーモパイルを用いて、レーザパワーの急激な変動の検出可能性について検証した。サーモパイルは出射端ハンドピースに組み込むことを想定し、図 5 のようにファイバ出射端脇に配置した。サーモパイルによる測定は、レンズを透過して集光されるレーザのパワー測定と同時に行い比較した。

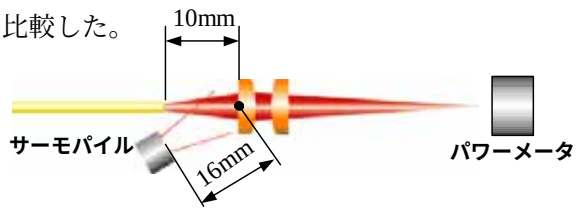

図 5　サーモパイル設置位置

３．　実験結果及び考察

３．１　CO_2 レーザ入射条件（集光レンズ）による損失特性の違い

f50、f100 レンズにより集光した集光スポット半径、バックフォーカス(BF)、CO_2 レーザの光軸と光線とのなす角(図 6)の測定値を表 1 に示す。また、入射レーザパワー15W における入射損失と中空ファイバ長さ当たりの伝送損失を図 7 に示す。

ファイバ内径φ0.7mm に対し、スポット径の小さい f50 の場合では、入射損失が非常に小さくなっている一方で、長さによる伝送損失が非常に大きくなっている。これは、入射した光線と光軸とのなす角が大きいために集光後の広がりも大きく、ファイバの内面での反射回数が多くなり、損失が増えたためであると考えられる。

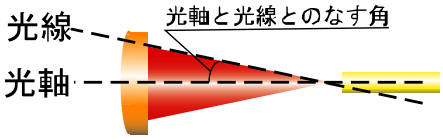

図 6　光軸と光線とのなす角

表 1　レンズ f 値による集光特性

レンズf値	集光スポット半径(mm)	BF(mm)	光軸と光線とのなす角(deg.)
50	0.058	45.5	2.4
100	0.198	118.3	0.8

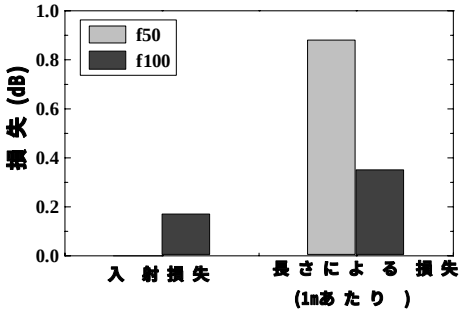

図 7　f50、f100 レンズにより集光した CO_2 レーザの損失特性の違い

３．２　CO_2 レーザの中空ファイバ曲げによる損失特性（ファイバ長 2m）

３．２．１　各曲げ条件における損失特性

f100 レンズで集光した CO_2 レーザを長さ 2m の中空ファイバに入射し、ファイバの曲げ半径、曲げ角度による損失の変化を測定した。結果を図 8 に示す。ファイバがストレートの状態、すなわち曲げ角度 0deg.の状態を損失 0dB としている。曲げ角度が大きくなるに従い、また曲げ半径が小さいほど損失が大きくなっている。図 9 に曲げ角度による損失特性（曲げ半径 R200mm における）、図 10 に曲げ半径による損失特性（曲げ角度 90deg.における）を示す。

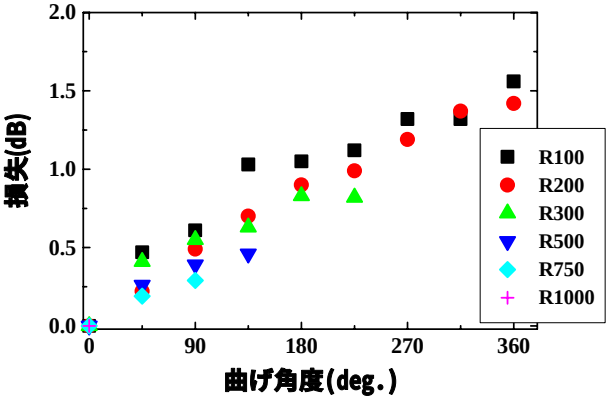

図 8　各曲げ条件による損失

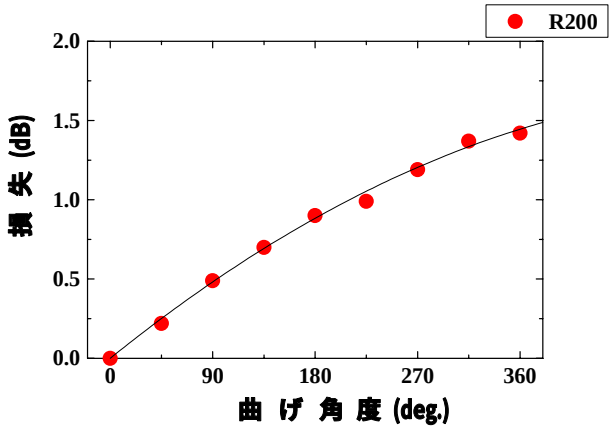

図 9　曲げ角度による損失特性
（曲げ半径 R200mm における）

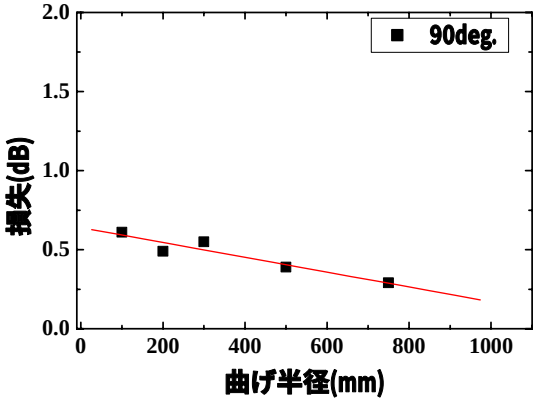

図 10　曲げ半径による損失特性
（曲げ角度 90deg.における）

３．２．２　中空ファイバ曲げによる損失の実験式

図 9、10 より、曲げによる損失特性は曲げ角度、曲げ半径の関数として表すことができると考えられる。そこで本研究では、様々な曲げ条件における損失を曲げ角度 A(deg.)、曲げ半径 R(mm)という 2 つのパラメータにより数式で表現することを試みた。図 9 より曲げ角度による損失特性は 2 次多項式で近似し、図 10 より曲げ半径による損失特性は、1 次関数として最小自乗法で近似した。曲げ半径 R200 における測定データから曲げ角度による損失 L_A(dB)は(式１)のように設定した。図 9 中の黒線はこの式による計算値である。

$$L_A = 0.0058A - 4.96\times10^{-6}A^2 \qquad （式１）$$

また、曲げ半径による損失は L_A に乗する係数 k_R として設定した。L_A は曲げ半径 R200 において設定した式であるので、任意の曲げ半径において L_A を表現するため、図 10 より求めた 1 次関数から R=200 における値を基準(k_R=1)とし、その何倍であるかを表す係数として(式 2)のように設定した。

$$k_R = 1.17 - 8.59\times10^{-4}R \qquad （式２）$$

(式 1)、(式 2)より、曲げによる総損失 L_{Bend}(dB)は、

$$L_{Bend} = k_R \times L_A \qquad \text{(式３)}$$

と表すことができる。

これにより、中空ファイバの総損失が概略計算出来る。例えば、f100 レンズで集光、入射した場合、2m の中空ファイバにおいて、曲げ半径 R300、曲げ角度 120deg. という曲げ条件では、総損失は次のように計算できる。

0.22dB[入射損失]+0.54dB[2m 伝送損失]
+0.57[曲げ損失]　=1.33dB[総損失]

３．３　　出射端ハンドピースの検討

３．３．１　中空ファイバから出射するレーザの広がり角(deg.)

ファイバにより導光されたレーザは広がりをもってファイバから出射する。中空ファイバの曲げ角度に対する出射レーザの広がり角(deg.)を図 11 に示す。曲げ角度の増加につれて広がり角は若干増加する傾向があるが、180deg.まで曲げても大きな変動はなく、1.2～1.8deg.程度の広がりである。

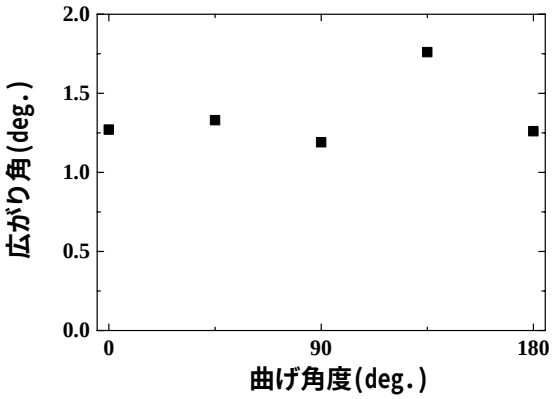

図 11　ファイバ曲げ角度に対する出射レーザの広がり角(deg.)(曲げ半径 R200mm の場合　)

３．３．２　集光特性の検討

中空ファイバ出射端から出射する CO_2 レーザを 5mm 間隔の f50 の平凸レンズ 2 枚で集光する場合（図 4）の集光特性を検討した。ファイバ出射端に最も近いレンズ表面における入射ビーム半径とレンズによる集光スポット半径の関係を図 12 に、入射ビーム半径とバックフォーカスの関係を図 13 に示す。レンズ入射ビーム半径を変えること、つまり、ファイバ出射端からレンズまでの距離を変えることにより、集光スポット半径、バックフォーカスを変化させることができる。

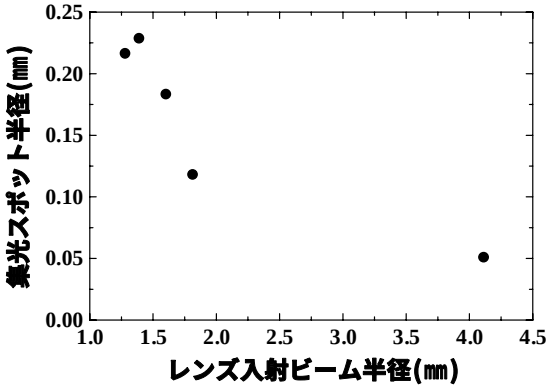

図 12　レンズ入射時のビーム半径と集光スポット半径の関係

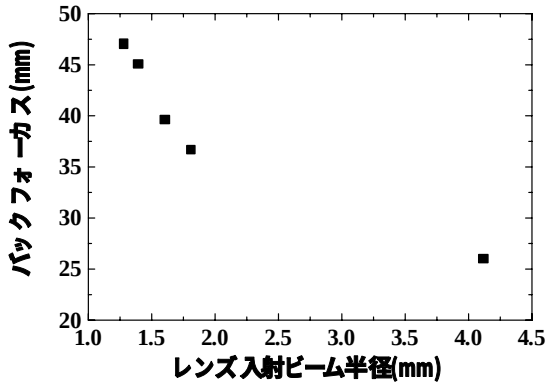

図 13　レンズ入射時のビーム半径とバックフォーカスの関係

３．４　ファイバ折れ検出技術について

ファイバ出射部において図 5 のような配置で、集光したレーザパワーをパワーメータにより測定し、出射端に最も近いレンズ表面での表面反

射・散乱光をサーモパイル赤外線センサにより同時に測定した。図 14 にレーザパワーメータによる測定値とサーモパイルによる測定値を示す。レーザ照射を開始した時間を 0sec.とし、およそ 240sec.の間一定のパワーで照射した後、停止させた。

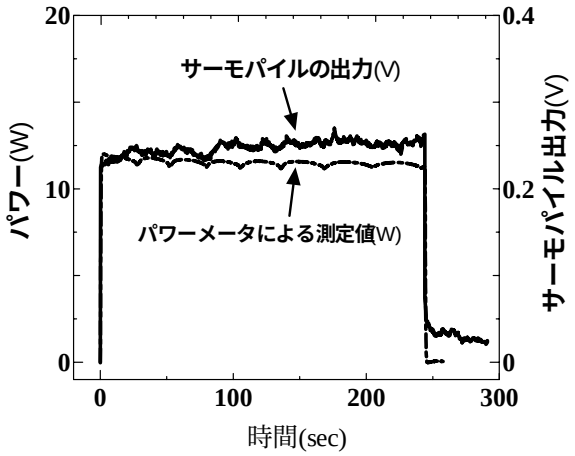

図 14　出射レーザパワーとレンズ表面での反射・散乱光の測定データの比較

0sec.におけるデータの立ち上がり、240sec.における低下についてサーモパイルの測定値はレーザの照射パワーに対してよく応答している。

しかし、レーザ照射時にパワーメータによる測定値が変動しながら若干の低下傾向を示しているのに対し、サーモパイルの測定値は逆に若干の増加傾向を示している。また、照射を停止した 240sec.後に完全に 0V まで下がらず、徐々に低下して 0V まで低下していく特性があった。この違いの一因として、レンズによる CO_2 レーザのわずかな吸収による温度上昇で赤外線放射量が変化したことが考えられる。しかし、その変化量は 240sec.の照射時間に対し、測定値の 10%程度である。ファイバ損傷等によりレーザ光が漏れた場合に発生すると考えられる出射パワーの低下はこの変動に比べて非常に大きくなると予想される。検証のための実験は必要であるが、入射パワー変動に対する出射パワーの変動の変化を捉えることでファイバの折れ等の破損を検出できる可能性がある。また、レーザパワーに対するサーモパイルからの測定データの変動はレンズの温度変化が原因であると考えられるため、レーザ照射時間の関数として表すことができると思われる。これを補正することによって、ファイバ折れ検出以外にも出射端におけるパワーモニタとして利用できる可能性も示している。

４．　結　　言

（１）CO_2 レーザの入射条件、曲げ条件による中空ファイバの損失特性の実験値から中空ファイバの曲げ半径、曲げ角度をパラメータとして損失特性を数値化し、特性を明らかにした。

（２）中空ファイバから出射するレーザの特性を把握した。出射端ハンドピース設計の際に必要となる、レンズ入射ビーム半径に対する集光スポット半径、バックフォーカスの関係が得られた。

（３）中空ファイバが折れるなどの破損によるレーザ光の漏れ対策のため、赤外線センサであるサーモパイルを使用し、出射端における集光レンズ表面での散乱・反射光を検出する方法を検討した。実際に中空ファイバが折れた状態における検証は必要であるが、中空ファイバの折れ検出方法として使用できる可能性を示した。

謝辞

本研究を行うにあたり、ご指導、ご助言をいただいた新潟大学工学部の新田勇助教授、坂本秀一助教授、㈱オプセルの管野明宏氏に感謝申し上げます。

参考文献

１）松浦祐司，宮城光信，“ 中空ファイバによるレーザ光伝送”，レーザ研究，27 巻，3 号，1999，　p173-177.

２）松浦祐司，宮城光信，“ レーザパワー伝送用中空光ファイバー ”，レーザ加工学会誌，10 巻，1 号，2003，p5-9.