

20KWクラス金属加工レーザ用の高性能光伝送装置

東北大学工学部 通信工学科

教授 宮城光信

(平成6年度研究開発助成 AF-94005)

キーワード：炭酸ガスレーザ、中空ファイバ、伝送特性

1. 研究の目的と背景

レーザの高効率利用においては、レーザ光をフレキシブルにターゲットへ導く伝送路の開発は不可欠であり、そのため伝送装置・伝送技術の進展がレーザの応用範囲に本質的な影響を及ぼしている。その中でも、数10KWのオーダの光電力を発生する炭酸ガスレーザ、一酸化炭素ガスレーザにおいては、それらの光を伝送可能にする伝送路の開発は挑戦的な研究の一つである。最近、中空導波路を用いることによって、申請者及び他の研究者により、1-3KWの炭酸ガスレーザ光の伝送が可能であることが示された。[1,2]

本研究においては、20KWクラスの炭酸ガスレーザ光、一酸化炭素ガスレーザ光を伝送するための誘電体内装金属中空導波路の設計・製作を行うと共に、伝送路からのビーム形状を制御する技術を確認することを目標とし、具体的な目的としては以下の3テーマを掲げ、研究を行った。

(1) 低屈折率誘電体内装金属中空導波路の製作と光電力容量の評価

伝送路の高性能化を企てるために、高屈折率のゲルマニウムの代わりに、低屈折率材料を用いた中空導波路の製作を行い、新しい材料を用いた場合の導波路の光電力容量を、炭酸ガスレーザ光、一酸化炭素ガスレーザ光に対して評価する。また、安定な製作技術の確立についても検討を行う。

(2) 多層誘電体内装金属中空導波路の設計と製作

低屈折率誘電体と高屈折率誘電体の多層膜を金属パイプ内に積層することによって、伝送路の超低損失化と大電力容量化を企てる。多層内装金属中空導波路の設計理論を明らかにすると共に、製作技術の確立も図る。

(3) 出力ビーム整形手法の研究

伝送路からのビーム形状を制御するために、比較的径の大きな導波路において、出力ビームを制御する手法を確認する。また、導波路の曲がりなどの構造不整に対して、出力ビーム形状が安定する導波路の単一モード化についても検討する。

2. 研究方法とその結果

研究目的に記述してあるテーマについて、その研究方法ならびに研究結果について詳述する。

2・1 低屈折率誘電体内装金属中空導波路の製作と光電力容量の評価

誘電体内装金属中空導波路におけるハイブリッドモードの減衰定数 α は

$$\alpha = \frac{1}{2} n_0 k_0 \frac{u_\infty^2}{(n_0 k_0 T)^3} \left[1 + \frac{a^2}{\sqrt{a^2 - 1}} \right]^2 \frac{n}{n^2 + \kappa^2}$$

と表される[3]。ここで n_0 、 k_0 、 T 、 u_∞ 、 a 、 n 、 κ は以下のように定義されている。

n_0 (=1): 空気の屈折率

k_0 : 真空中の平面波の波数

T : 中空導波路の内半径

u_∞ : 正規化横方向位相定数

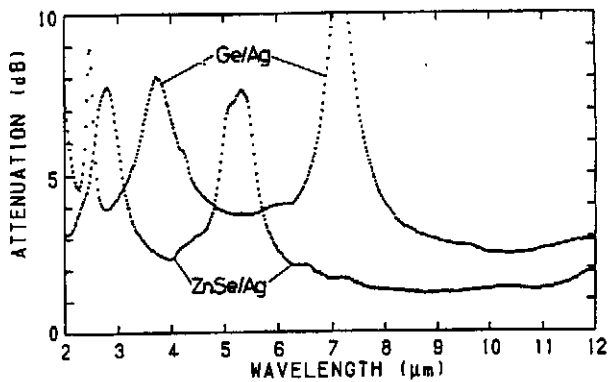
an_0 : 誘電体の屈折率

n : 金属の複素屈折率の実部

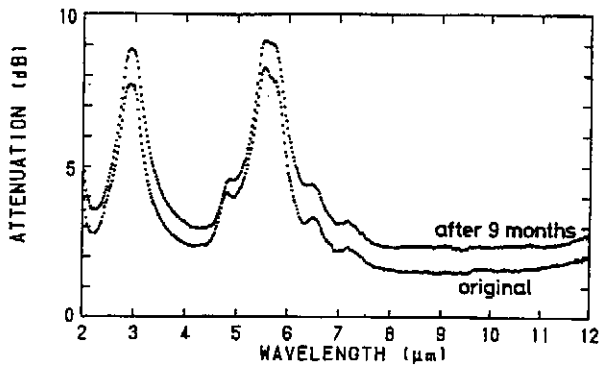
κ : 金属の複素屈折率の虚部

内装される誘電体の屈折率が約1.4の時、モードの減衰定数は最小値を持つ。従来は内装誘電体としてゲルマニウム(屈折率は波長10.6 μm では約4.0)を用いていた。屈折率が4.0よりも小さな材料を用いることにより、モードの減衰定数を小さくすることになる。

本研究では、先ず誘電体の候補として、屈折率2.4を持つセレン化亜鉛(ZnSe)を選択した。図1に製作したセレン化亜鉛銀(ZnSe/Ag)中空導波路とゲルマニウム内装銀(Ge/Ag)中空導波路の損失スペクトルを示す。両者とも、半値幅3.5度の大きな拡がり幅を持つビームで評価された。ZnSeを選択することにより、損失は大きく下げ得ることが明らかになった。しかしながら、ZnSe/Ag中空導波路の経時変化を調べたところ、約9ヶ月後には図2に示すように損失が増加した。この原因はZnSeが酸化し、ZnOとSeO₂に変化するためであることが分かった。これらの物質は赤外波長帯では不透明であるため、損失が波長に対して一様に上昇したこと、劣化したZnSe/Ag中空導波路を水酸化ナトリウム水溶液、アンモニア水等のアルカリ中に浸漬すると、膜の殆どが剥離することなどからも推察することが出来た。



(図1) ZnSe/Ag 中空導波路 (内径 1.5mm、長さ 25cm) の損失スペクトル中空導波路は半値幅 3.5 度のガウスビームで励振

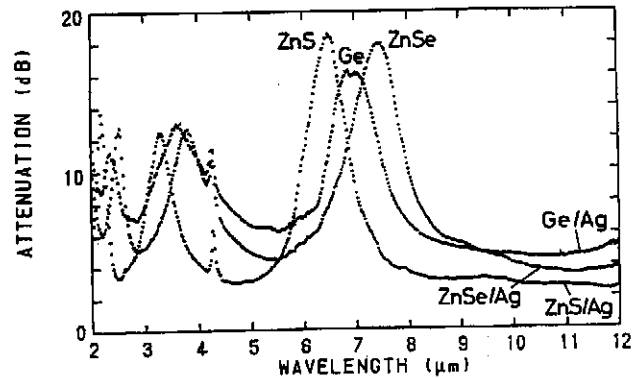


(図2) ZnSe/Ag 中空導波路 (内径 1.5mm、長さ 1m) の経時変化

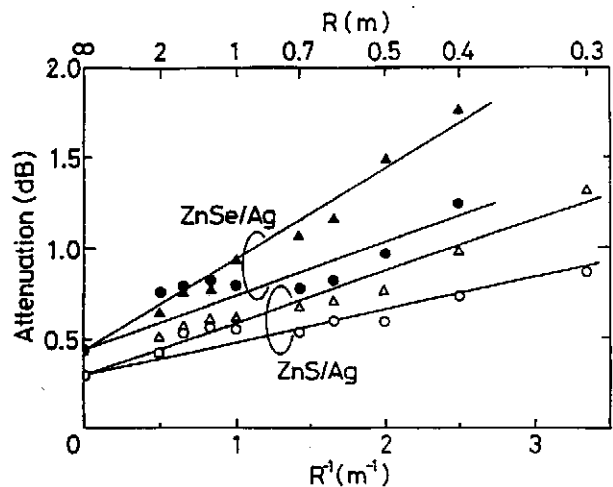
材料が導波路の経時変化特性に大きな影響を及ぼすということが分かったので、対環境特性に着目し、安定と予想され、しかも屈折率が ZnSe よりも 2.2 と小さな硫化亜鉛 (ZnS) を選択し、ZnS/Ag 中空導波路を製作した。図 3 には、製作した Ge/Ag、ZnSe/Ag、ZnS/Ag 中空導波路の損失スペクトルを示す。炭酸ガスレーザーの波長 10.6μm においては、ZnS/Ag 中空導波路は最も低損失になっており、その値は Ge/Ag 中空導波路の約半分にもなっている。更にまた、ZnSe/Ag 中空導波路と比較しても、ZnS/Ag 中空導波路の損失はかなり小さくなっているが、この損失差は屈折率差から予想される以上のものである。これは内装された ZnS 膜の特性 (結晶性、吸収係数など) が ZnSe の特性よりも優れていることによる。図 4 には炭酸ガスレーザー光に対する中空導波路の曲げ特性を示す。更にまた、また良好な特性を持つ ZnS/Ag 中空導波路が得られる割合 (歩留まり) は ZnSe/Ag 導波路よりもかなり高いことも確認され、本導波路は、工業的にも高出力炭酸ガスレーザー用の伝送媒体として優れた特性を持つこと

が明らかになった。

本導波路の製作法は、母材パイプの外面に先ず誘電体をスパッタリングし、次に銀をスパッタリングし、サポート管としてニッケルめっきを施し、最後に母材パイプをエッチングするという方法である。導波路の低損失化が進むにつれ、得られた中空導波路の内面粗さが損失に影響を及ぼすということが明らかになってきた。そこで内面粗さを低減するために、母材パイプそのものについても検討した。この課題については、2.2 節で詳述する。



(図3) 各種中空導波路 (内径 1mm、長さ 1m) の損失スペクトル特性。半値幅 3 度のガウスビームで励振



(図4) ZnS/Ag 中空導波路 (内径 1mm、長さ 1m) の CO₂ レーザ光に対する曲げ損失特性。○●、△▲はそれぞれ、電界が曲げ平面に対して垂直、水平な場合に対応

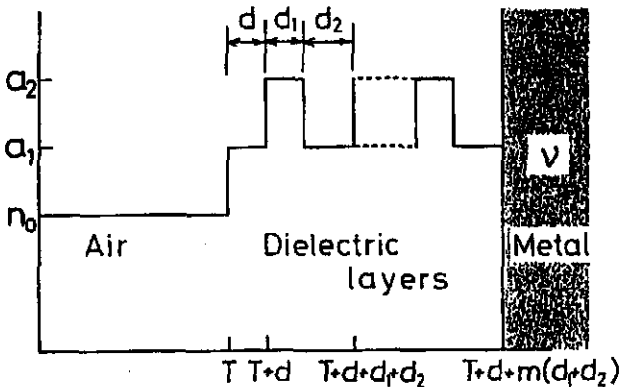
2・2 多層誘電体内装金属中空導波路の設計と製作

誘電体内装導波路の損失を小さくする第 2 の方法は、図 5 に示すように、屈折率 (a_2n_0) の大きい誘電体と、屈折率 (a_1n_0) の小さな誘電体を $2m+1$ 層の多層化を行うことである。ここで各層 ($i=1, 2$) の膜厚 d_i

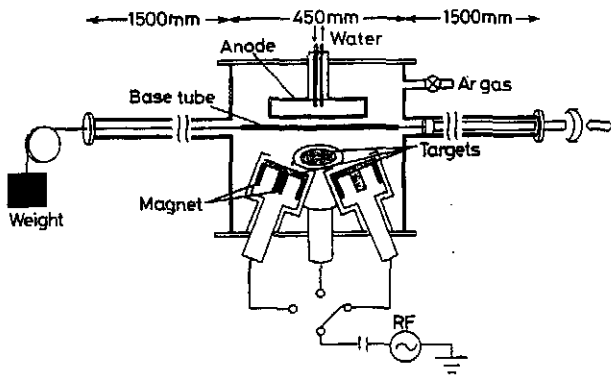
$$d_i = \frac{\lambda}{4\sqrt{a_i^2 - 1}}$$

とし、 d は層の数によって特定された値を持てば良い[3]。比較的少ない層数で減衰定数を小さくするためには、選択する屈折率差を出来るだけ大きくすれば良い。

多層誘電体内装中空導波路を製作する場合の問題点は、誘電体膜同士の接着性、誘電体と金属との接着性である。これらの問題を解決するために、低屈折率誘電体材料としては、既に実験的にも確認されている ZnS を選択した。一方、高屈折率誘電体材料としては、これまでの研究で実績を有する Ge を選択した。



(図5) 多層誘電体内装中空導波路の構造



(図6) 多極スパッタリング装置の構造

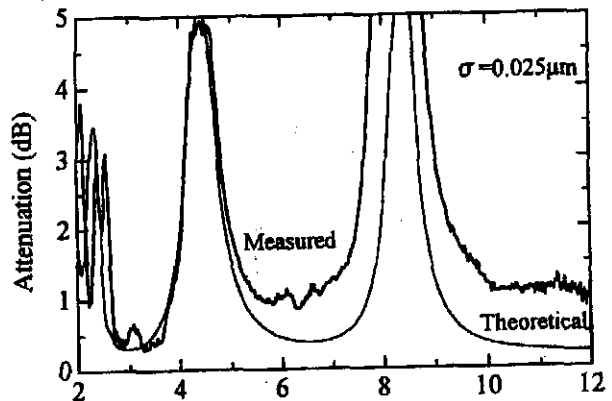
誘電体を多層化し、モードの減衰定数の低減をはかる場合、製作された導波路の内面粗さが損失に本質的な影響を及ぼす。そこで、誘電体、金属（銀）をスパッタリングする場合の母材パイプの表面粗さを低減するための研究を行った。当初は母材として、良く研磨されたアルミニウムパイプを用いていた。次に、アルミニウム表面にポリイミドをコートしたパイプに変更した。しかしながら、これでもなお、表面粗さを十分小さくすることは

不可能であった。そこで、ガラス表面は最も滑らかさが得られることに着目した。しかも、このガラスを弗酸などのような危険なエッチング液を用いない方法として、酸可溶ガラスの研究を行った。SiO₂-PbO からなるガラスは酢酸などの弱酸を用いても容易にエッチングできることが分かった。それと同時に、このガラスはまた、通常ガラスに比較しては安定ではない。そこで、このガラスにポリイミドをコートし、表面が滑らかで安定な母材パイプとした。

多層誘電体内装金属中空導波路を製作するにあたっては、図6に示すように、真空装置内に Ge、ZnS それに金属として Ag のターゲットを配置し、母材パイプを真空装置内で回転と移動を繰り返しながら、これらの材料を所定の膜厚になるよう、成膜していく。良質な膜、膜の付着力を得るためには、母材パイプの回転速度、パイプの移動速度、スパッタリング電力などを最適化しておく必要がある。本研究では、多層薄膜のうち、最も簡単な構造として、ZnS-Ge-ZnS の3層からなる金属中空導波路（以後、mlt/Ag 中空導波路と略記）の製作を試みた。波長が 10.6 μ m のモードの損失を最低にするための膜厚はそれぞれ、0.24 μ m、0.19 μ m、0.36 μ m である。多くの試行錯誤の結果、真空装置内の Ar ガスのガス圧も含め、表1に示す条件が導波路を製作するための最適な条件であることが明らかになった。

表1. スパッタリング条件

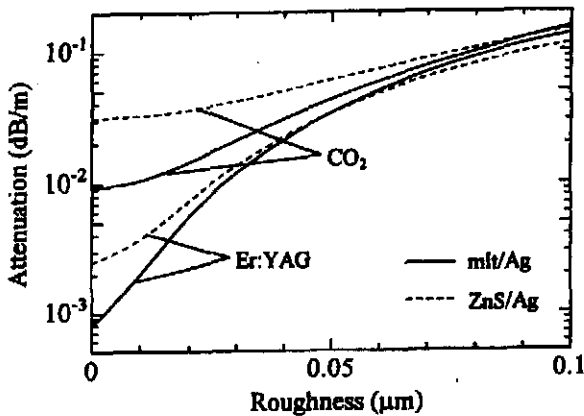
	ZnS(d)	Ge(d _G)	ZnS(dZnS)	Ag
Ar Pressure ($\times 10^3$ Torr)	6	6	6	5
Power (W)	200	200	200	300
Moving Speed of Mandrel (cm/mm)	8	11	7	30
Times of Coating	2	4	4	1



(図7) mlt/Ag 中空導波路 (内径 0.8mm、長さ 20cm) の損失波長特性。中空導波路は半値全幅 4.3 度のガウスビームで励振

図7には製作された ml/Ag 中空導波路の損失スペクトル特性を示す。測定された実験値を理的に予測される値と比較したところ、ZnS、Ge、ZnS の膜厚はそれぞれ、0.22 μm 、0.20 μm 、0.31 μm となり、設計値とそれ程大きくはずれていなかった。また、内面粗さの大きさは 0.025 μm という値が得られた。

内面粗さの損失に及ぼす影響については、理論解析も行った。図8には内面粗さの大きさを変え、内径 0.8mm の ZnS/Ag 中空導波路と ml/Ag 導波路についての HE₁₁ モードの損失を示す。多層になるにしたがい、粗さの損失増加に及ぼす影響は大きくなることが分かった。



(図8) ZnS/Ag および ml/Ag 中空導波路 (内径 0.8mm) の損失の粗さ依存性

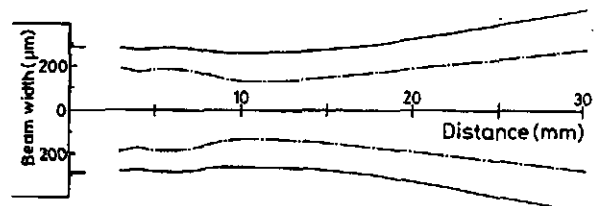
2・3 出力ビーム整形手法の研究

中空導波路からのビーム形状を制御の課題にとりかかる前段階として、中空導波路からの出射ビームの形状についての理論解析を行った。先ず始めに、実際にほぼ HE₁₁ モードが伝送されている中空導波路からの出射パターンは、理論的に予測される結果とほぼ一致することを確かめた。次に、理論解析を用い、中空導波路から出射されるビームについて、導波路から離れるにしたがって、どのような形状をとるかについて解析した。図9に得られた結果の一例を示す。ビームは導波路からある適当な距離 d だけ離れたところで最も収束されることが理論的に始めて明らかになった。この距離 d は、中空導波路の外径を $2T$ 、波長を λ とすれば、

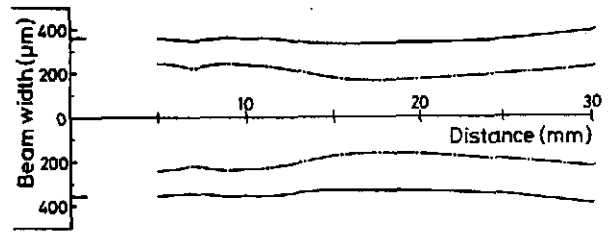
$$d = (2T)^2 / (6\lambda)$$

で求められることが分かった。

これは導波路端の中心からの距離と、導波路端の最も遠い点からの距離の差が $3\lambda/4$ ($3\pi/2$ の位相差) となる距離である。また、この距離におけるビーム径は導波路径の 67% となる。



(a)

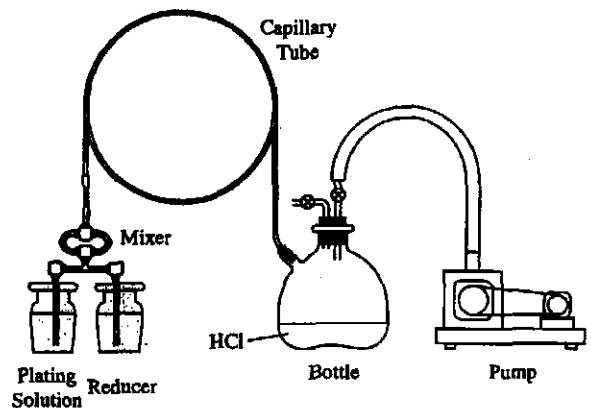


(b)

(図9) 内径 0.8mm (a) 及び 1mm (b) の導波路からの出射ビーム幅実践はピーク値の $1/e^2$ 、一点鎖線は $1/2$ で定義したビーム幅

2・4 細径中空導波路製作の新しい手法

滑らかな表面をもつ母材パイプの表面に、誘電体や銀をスパッタリング法で成膜し、サポート管としてニッケルをめっき法で形成し、誘電体内装金属中空導波路を得る方法は、その長さが 1-2m と短い時、あるいは内径が 0.8mm 程度までは可能であるが、内径が小さくなると適用できなくなる。そこで、本研究では全く新しい方法を考案した。この方法はまた同時に、内面粗さを大幅に軽減する方法でもある。

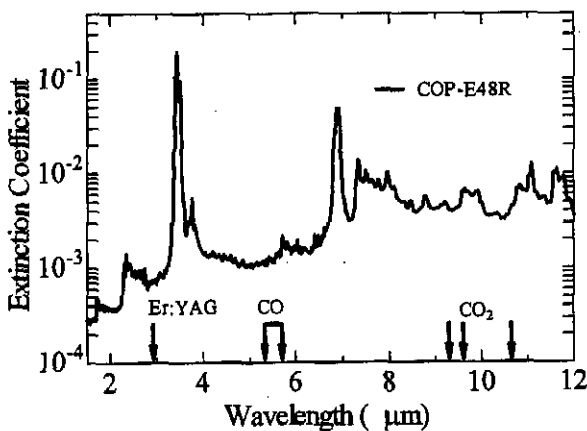


(図10) 銀中空ファイバ製作法の模式図

ガスクロマトグラフィーで使用されている、細径石英ガラスキャピラリーチューブをサポート管として用いる。図10に模式的に示すような装置を用い、石英キ

ヤピラリーパイプ内に、銀鏡反応によって銀膜を成膜する。通常行われる銀鏡反応では、空気に接する面の銀膜の表面粗さは極めて大きい。本研究では、銀液と還元液の混合条件及びその方法、ミキシング後の送液速度について研究を行い、内面粗さが20nm程度の銀中空パイプを製作することが可能となった。

次に内装する誘電体として、当該波長帯で透明なポリマーを選び、溶媒で希釈したポリマー溶液を銀中空ファイバに一定速度で流し、液状膜を形成する。次にその液状膜を窒素雰囲気中で乾燥させ、一定膜厚のポリマー膜を銀中空ファイバに内装させた誘電体内装銀中空ファイバを得ることが出来る。当該波長、特に炭酸ガスレーザーで透明なポリマーを得ることは困難であった。かなりの多くのポリマーを調査し、最終的には環状オレフィンポリマー (Cyclic Olefin Polymer、以後COPと略記) が適していることを見出した。また、溶媒の選択も重要であり、膜厚の均一性に大きな影響を及ぼす。何種類かの溶媒について調査した結果、シクロヘキサンが最も適していることが分かった。これらの技術を組み合わせた新しい製法により、長さ2m、内径0.32mm程度のCOP内装銀中空 (COP/Ag) ファイバを製作出来るようになり、超細径中空ファイバ製作技術に道を開くきっかけを作った。

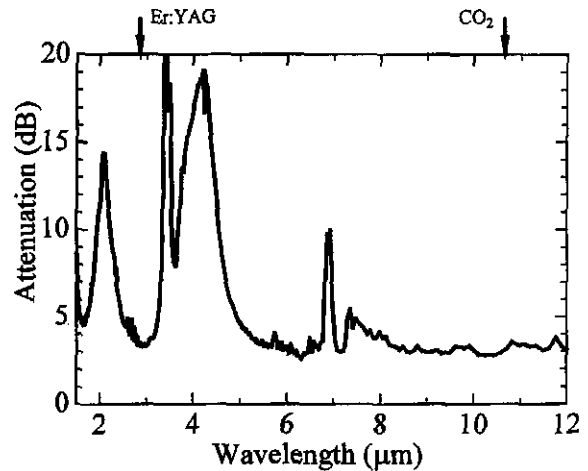


(図11) 赤外波長帯におけるCOPの消衰係数

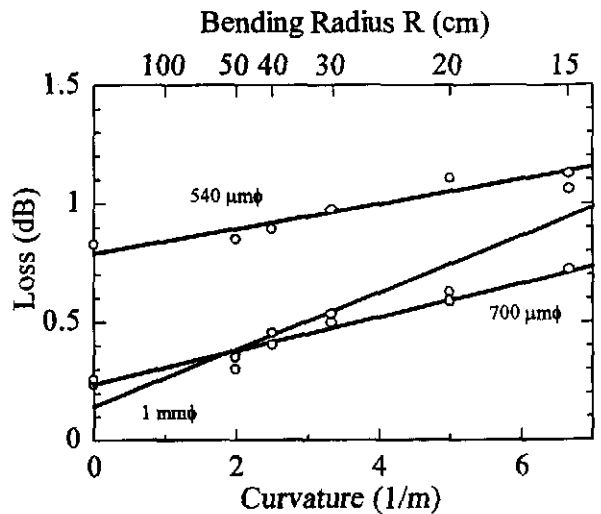
図12には、CO₂レーザー光伝送用の内径0.7mm、長さ1mのCOP/Ag中空ファイバの損失スペクトルを示す。波長2μm、4μmの損失ピークはCOP膜の干渉によるものであり、波長3.5μm、7μm帯の吸収はCOPの吸収特性である。8μm以上でも非常にブロードな吸収はあるが、比較的低損失性が達成されていることが分かる。

図13には長さ1m、内径1mm、0.7mm、0.54mmのCOP/Ag中空ファイバの、CO₂レーザー光に対する曲げ損失特性を示す。内径0.54mmの中空ファイバの場合、内径が大きい場合のファイバに比較し、曲げた時の損失は直線状態の損失に比較し、その付加損失は小さいこと、極めてフレキシブルであること、パワー密度を

大きくすることが出来るなどの特徴を有している。なお、本中空ファイバはパイロット光として、赤あるいは緑の光も同時に低損失で伝送することが出来るという特性も有している。



(図12) CO₂レーザー光伝送用COP/Ag中空ファイバ(内径0.7mm、長さ1m)の損失スペクトル。中空ファイバは半値全角12度のガウスビームで励振。



(図13) 長さ1m、内径1mm、0.7mm、0.54mmを有するCOP/Ag中空ファイバの曲げ損失

3. 結言

大きな出力のCO₂レーザー光を伝送するための、高性能光伝送装置を実現するための基礎研究を行うために、低屈折率誘電体内装金属中空導波路の製作、多層誘電体内装金属中空導波路の設計と製作、出力ビーム整形手法などについて研究を行った。大きな出力レーザーからの光を伝送するための実験は行うことが出来なかったが、伝送路の低損失化は達成された。しかしながら、導波路は多モード伝送であるため、ビーム形状の制御

については、なお課題を有している。

研究の途中で、誘電体内装金属中空導波路は単一のレーザ光だけでなく、幾つかの波長の光を同時に伝送することが分かり、この性質を利用しての新しい応用分野を開拓することが出来た。

4. 謝辞

本研究を行うにあたり、天田金属加工機械技術振興財団から多額の援助を頂き、心より感謝する。また、本研究の協力者でもあった研究室の諸氏にも感謝する。財団の援助と研究協力者の力で研究を大きく推進でき

たことを最後に記し、謝辞とする。

参考文献

- 1) A. Hongo, K. Morosawa, T. Shiota, Y. Matsuura, and M. Miyagi : IEEE J. Quantum Electron., Vol. 26 (1990) 1990.
- 2) A. Hongo, K. Morosawa, K. Matsumoto, T. Shiota, and T. Hashimoto : Appl. Opt., Vol. 31 (1992) 5114.
- 3) M. Miyagi and S. Kawakami : J. Lightwave Technol., Vol. LT-2 (1984) 116.