特集 9

CO₂ レーザー用導波路

久 保 宇 市 *

(1986年3月20日 受理)

Light Guide for CO₂ Laser

Uichi KUBO*

(Received March 20, 1986)

1. はじめに

レーザー発振器からの放射ビームを所望の対象物に照射する場合、レーザー加工ではレーザー光に対して加工対象を移動させるか、反射鏡を用いるなどの方法で行う。しかし、レーザーを医療に用いる場合、対象が人間であるから、人間を動かして治療することは適当でない。どんな用途の場合でも術者の思い通りに特定の位置へ正確にレーザー光を照射でき、しかも照射端を自由自在に操作できなければならない。微細な領域の手術（たとえば、脳外科）では顕微鏡視野内でレーザー光の照射位置を移動させればよいので、光学系で操作することができる。しかし、一般的な医療ではレーザー発振器と無関係に広い範囲で自由にレーザー照射できることが必要である。

これらの点から光通信に関連して開発された石英系の光ファイバーによる導波方式が考えられる。これは可視・近赤外域の光に対して有効な導波方式である。また、医療の場合、パワー伝送が必要であるが、石英系光ファイバーの伝送損失は非常に低いので、パワー伝送も可能であり、YAG レーザー（波長、1.06 μ m）、Ar

レーザー（波長、0.488, 0.515 μ m）などの導波系として実際に使用されている。

しかし、石英系ガラスファイバーはCO₂ レーザー（波長10.6 μ m）などの中間赤外光に対して不透明であるので使用できない。したがって、CO₂ レーザー導波路には通常の光ファイバー以外の導波系が必要になる。この導波方式には現在、いくつかの自在継手に似た関節を設けて中空管をつなぎ、関節部に反射鏡を組み合わせた多関節形導波路が一般に使用されている。また、光ファイバー導波方式でコア材にCO₂ レーザー用光学素子材料を用いたものも開発されつつある。さらに、これらと異なり、レーザー光を反射させる金属を用い、しかも可撓性を持たせた金属中空管形導波路の開発も進められている。これらの一覧を次に示した。

多関節反射鏡形導波系……鏡反射式空中伝送
光ファイバー形導波系……コア物質中伝送

コア物質（例）

$\left\{ \begin{array}{l} \text{TlBr} + \text{TH(KRS-5)}, \text{TlBr}, \text{AgCl}, \\ \text{AgBr} \\ \text{CsBr}, \text{As} + \text{Se}, \text{Ge} + \text{Se} \text{ など} \end{array} \right.$

中空金属形導波系……金属板・パイプ内反射
式空中伝送

* 近畿大学理工学部電気工学科（〒577 東大阪市小若江3-4-1）

Department of Electrical Engineering, Faculty of Science and Technology, Kinki University
(3-4-1 Kowakae, Higashiosaka, 577).

Fig.1 多関節反射鏡形導波路

以下に、CO₂レーザー用導波路の国内における現状、開発状況を説明する。

2. 多関節反射鏡形導波路

CO₂レーザーには前述のように、石英系ガラスファイバーが使えないので、反射鏡を組み合わせた関節状の導波系が使われている。レーザー光が通る径路は一般に金属の円筒内であり、多関節反射鏡導波路はちょうど互いに直角な面内で動く円筒の組み合わせである。いくつかの回転する関節部には反射鏡が設けられており、レーザー光は鏡に対しては一定の方向に反射されるようになっている。鏡を回転させると、レーザー光は一つの平面内でどの方向にも自由自在に放射することができる（Fig. 1）。

多関節反射鏡形導波路は重く、動く自由度の少ないことが問題である。操作性を高めるためには関節数を増やせばよいが、関節には反射鏡を置くので（関節数は反射鏡の個数と同じ）、反射鏡の個数も増え、反射率100%でない限り、光の損失が生ずる¹⁾。また、レーザー光の径路を狂いなく、放射端に誘導する光軸合せも複雑になる。この関節数は7個ぐらいが最もよく用いられているが、1枚の鏡の反射損失は2%以下に抑えられ、全損失は12%以下のものが作られている²⁾。反射損失を少なくするため、3個程度に少なくした例もある。

Fig.2 多関節反射鏡形CO₂レーザーメス

多関節反射鏡形導波路を用いたCO₂レーザーメスの写真をFig. 2に示した。これは1974年頃イスラエルのレーザーインダストリーズ社で作られた世界で最初に実用化された装置である。導波系は約10年を経た今日でも見劣りのしない洗練された技術を示している。

操作性向上を目指して、導波系の軽量化をはかった例がある。これは住友電気工業が開発したもので、カーボンファイバーを芯にしたプラスチック材料（CFRP：carbon fiber reinforced plastic）で円筒をつくり、この中へ薄肉厚のアルミニウム円筒を挿入して二重の円筒にしたものを反射鏡支持円筒に用いた（Fig. 3）³⁾。このCFRPは従来のステンレスの1/5、アルミニウムの1/1.7程度の重量で非常に軽く、しかも強度は十分確保できる。これによって導波系全体が軽くなり、多関節導波系の平衡をとるための平衡錘が不要で、渦巻ばねでも

平衡がとれる。この多関節導波系を用いた住友電気工業製のCO₂ レーザーメスを Fig. 4 に示した。

Fig.3 CFRP パイプの構造

Fig.4 CFRP 使用 CO₂ レーザーメス

3. 光ファイバー形導波路

CO₂ レーザー用導波路の光ファイバー形式のものはコア材料が問題である。CO₂ レーザーの 10.6 μ m 光は前述のように、通常の石英ガラス系材料には強く吸収されるので透過せず、逆にガラスを破壊する。CO₂ レーザー光に対して透明な材料は CO₂ レーザーの透過窓材などに使わ

れている金属ハロゲン化物、金属酸化物、カルコゲン化物などである⁴⁾。素材の種類、加工方法により、さらに単結晶形、多結晶形、ガラス形に分かれる。現在、製造上の問題、素材の毒性、潮解性、透過損失の理論値と実験値とのかなりの相違など、種々の問題を抱えている。

最も早く開発されたのは金属ハロゲン化物に属する TlBr と TlI の多結晶 (KRS-5) で、1977年にワシントンで開かれたレーザー工学と応用の国際会議 (CLEA) において、Hughes 社 (アメリカ) の Pinnow 氏らが発表した。これは KRS-5 の単結晶プリフォームを加熱 (200 ~ 350℃) して、押出し加工法で線引きし、コアを作ったものである。得られたコアをテフロンチューブの中へ挿入した形で光ファイバーを形成する (Fig. 5)。このファイバー構造はルーズクラッド形と呼ばれている。コア径 0.5mm ϕ 、長さ 1 m の KRS-5 ファイバーで連続発振約 2 W の CO₂ レーザー光を送し、伝送率約 90% が得られている⁵⁾。

国内でも KRS-5 ファイバーの開発が進められており、掘場製作所は医療福祉機器研究所 (通産省工業技術院) の CO₂ レーザーメスの開発プロジェクトの中で導波系を担当し、1981年に KRS-5 多結晶をコアにしたルーズクラッド形の光ファイバーを試作している (Fig. 6)。コア径 1 mm ϕ 、長さ 87cm のファイバーで得られた

Fig.5 ルーズクラッド形 CO₂ レーザー用光ファイバー

Fig.6 KRS-5 光ファイバー

Fig.7 光ファイバー形CO₂レーザーメス

最大放射出力は68W(20秒間)であった⁶⁾。また、松下電器でも1982年にKRS-5ファイバーを試作し、1983年にはコア径0.5mmφ、長さ1.5mのファイバーで最大放射出力74W、1時間以上の伝送で伝送率(反射損失を含む)67.5%を得ている⁷⁾。同社では、このファイバーを用いた独自のCO₂レーザーメスも試作している(Fig.7)⁸⁾。このほか、古河電工、オリンパスでもKRS-5ファイバーの開発が進められている^{9,10)}。

KRS-5などの多結晶ファイバーは押出し加工法で作られているため、単結晶プリフォームが塑性変形を起こし、押出されたファイバーは数10μmの微結晶体から成る。したがって、この種のファイバーでは微結晶粒およびコア表面の不整による散乱損失が予想されている¹¹⁾。この散乱損失はファイバーを熱処理することで低減させることができ、古河電工では1mあたりの伝送損失を6.5%から3%にした例を報告している¹²⁾。また、多結晶ファイバーには経時変化があるといわれている。この原因は空気中の水分との反応でコアの表面散乱が増加するためと考えられており、熱処理で抑えることが可

能であるという報告もある¹³⁾。

その他の損失要因として、光ファイバー入射出端面の反射損失があげられる。KRS-5の場合、屈折率が2.37と大きいため、反射損失は約30%にもなる。そこで、この改善策として、松下電器・松下技研ではAs₂Se₃/KCl/As₂Se₃の三層構造の反射防止膜を両端面に真空蒸着する方法を用い、反射損失を約4%に低減させている¹⁴⁾。この反射防止膜は耐パワー性も良好で、入力95W、パワー密度95kW/cm²以上に耐える¹⁵⁾。

KRS-5をコアにした光ファイバーは最近では、ルーズクラッド形から通常の石英系光ファイバーのように、コアとクラッドが密着したコア・クラッド二重構造と呼ばれる形に進んでいる。クラッド材料にはKRS-5より屈折率が小さい材料が選ばれている。具体的にはアクリル樹脂、TlBr、KRS-6(TlCl+TlBr)、AgClなどがあげられている。この場合、問題になるのはクラッド材による光吸収が大きいと、伝送率は著しく低下し、クラッド層が発熱して溶ける例もあることであり、この原因は製作法によることが多い。製作法には押出し法、蒸着法、樹脂コーティング法など種々の方法があり、堀場製作所、松下電器、古河電工などではそれぞれ独自の製作法で開発を進めている。

蒸着法の例として、堀場製作所では直径1mmφのKRS-5ファイバーにKRS-6を約10μm蒸着したファイバー(長さ30cm)で20W連続伝送できたと報告している¹⁶⁾。

アクリル樹脂は熱に対して弱い欠点をもつが、松下電器ではポリエチレンで被覆したコア・クラッド形ファイバーの入射出端面の被覆を長さ約10cmはがして用いると、入力90Wにも耐えると報告している¹⁷⁾。

古河電工ではKRS-5をコア、TlBrをクラッドとしたファイバーを試作している。コア・クラッド構造のプリフォームを押出し加工で細径化する方法を用いて、コア径0.7mmφ、外径1mmφのファイバーを作製し、約80%/mの伝送率を得ている¹⁸⁾。

このように臭化タリウム系の材料をコアとし

た CO₂ レーザー用光ファイバーが試作されているが、この種の材料にはタリウムが含まれており、この毒性が問題になっている。しかし、タリウムだけが遊離するか、特定の化合物を作らなければ、危険性は少ないといわれ、各種の条件化で安全性が調べられている。また、破損した場合の安全性保持の対策について、被覆など製作技術の面から検討されている。このために光ファイバーとしての機能上重要である柔軟な可撓性が損われる傾向が見られる。この点、AgBr, AgCl などを用いたコア材に用いると安全ではあるが、10.6 μ m 光に対する吸収係数が臭化タリウム系に比べて大きい欠点がある。これら銀ハライド系のコアを用いた光ファイバーは住友電工、持田製薬で研究が進められている。

住友電工では AgBr と AgCl の混晶ファイバー¹⁹⁾、AgBr 多結晶ファイバー²⁰⁾ あるいは AgBr をコア、AgCl をクラッド材に用いたステップインデックス形のファイバー²¹⁾ を試作している。コア径1.5mm ϕ 、クラッド厚0.35mm、長さ1.5mの光ファイバーの伝送損失は約5%/mであり、連続放射出力は50Wを得ている。また、同社はこのファイバーを用いたCO₂レーザーメスも開発している²²⁾。

持田製薬では AgCl をコア材にした光ファイバーを開発しており、コア径1.5mm ϕ 、長さ80cmの光ファイバーで放射出力20Wを得ている²³⁾。同社もこのファイバーを用いた CO₂ レーザーメスを試作している。

以上の光ファイバーは全て多結晶形であるが、単結晶形の光ファイバーも開発が進められている。KDD (国際電信電話) 研究所では独自の製法でKCl, AgBr, KRS-5 等の単結晶ファイバーを試作しているが、現在では毒性、潮解性のない CsBr を主として作製している²⁴⁾。このファイバーの構造は Cs Br 単結晶 コアをテフロンチューブで被覆し (ルーズクラッド形)、チューブの両端は熱損傷を避けるため、アルミ箔で覆ったものである。コア径1.6mm ϕ のファイバーの伝送損失は約7%/m、最大放射出力は40Wであった²⁵⁾。さらに高出力の伝送を行うと、

CsBr コアの発熱でテフロンチューブが溶ける場合がある。東芝ではこの解決策として、テフロンチューブ内にN₂ ガスを流して、CsBr コアを冷却し、最大放射出力59Wを得ている²⁶⁾。

カルコゲン化物ガラス (AsSe, GeSe) は従来から赤外光学物質として興味を持たれており、中間赤外光ファイバーのコア材としても注目されている。これを用いた光ファイバーは NTT (日本電信電話) 茨城通研、防衛医大・堀場製作所で開発が進められているが、中間赤外光による通信用^{27,28)} や CO レーザー (波長5.3 μ m) のパワー伝送用^{29,30)} として開発が進められている。

4. 中空金属形導波路

光ファイバーのように、光の吸収損失が小さい特定の媒質で作られたコア中を伝送させるのではなく、空気中に光を閉じ込めて伝送させる方式がある。これが中空導波路と呼ばれるもので、赤外ファイバーに比較して次のような利点をもっている。

(1) レーザー光の伝送媒質が空気であるから、伝送されるレーザーパワーによってコアあるいはクラッドの加熱、燃焼による損傷、ガスの発生などの心配も全くなく、安全であり、高出力伝送が可能である。

(2) 入射・出射端面での反射が少ない。赤外ファイバーのコア材は屈折率が大きいため、反射が大きい。

(3) 機械的強度が大きく、安定している。

中空導波路にも種々の方式があるが、その一つにマイクロ波の導波管形の中空導波路がある。これについては、1976年、当時、南カルフォルニア大学にいた Garmire 氏らが CO₂ レーザー光の高出力伝送を目的として理論的に検討し、基礎的な実験も報告している³¹⁻³⁴⁾。

著者らは Garmire 氏らとは独立に、この形式の導波路を CO₂ レーザーメスに応用する目的で開発を進めている³⁵⁻³⁸⁾。これは2枚の細長いアルミ薄板を高分子スペーサーを介して平行に保ち、外側を整形材で巻くか、固め、中空導波路を形成させる方式である (Fig. 8)。この断

Fig. 8 可撓中空金属導波路の構造

面は長方形で、長辺部がアルミ薄板、短辺部が高分子スペーサーであり、極めて簡単な構造である。アルミ薄板の内面は光学的鏡面に仕上げられており、レーザー光は内面で反射しながら伝播される。中空路断面の寸法は現在、長辺8mm、短辺0.5mmで、外観は幅約1cm、厚さ約1mmの可撓性をもつリボン状のものである。長さ1mの中空導波路で約80Wの放射出力が得られ、伝送率（結合損失を含む）は約85%である³⁹⁾。また、この状態で連続15分以上の伝送にも十分耐えることが確かめられている。可撓性は半径10cmの円状にまで曲げることができ、捻りに対しても長さ1mの導波路を180°まで捻ることが可能である。

この導波路を用いて、CO₂レーザーメスも試作している。Fig. 9 は水平方式のCO₂レーザーメスを用いて、ウシの大腿骨を穿孔中の写真である。しかし、実際のCO₂レーザーメスを検討すると、水平方式よりもFig. 10に示すごとく、レーザー発振器を高い場所に置いて、導波路を垂らす形式が使いやすいと考えられる。実際にこの垂直方式で試作した装置をFig. 11に示した。この方式は製作に要する材料費が安価であること、安全性が高いことに特長があり、伝送率、可撓性の向上、長尺化など改善が進められている。

この中空方式の特別なものとして、全反射方式のものが電総研で試作されている⁴⁰⁻⁴²⁾。これは金属による反射ではなく、光ファイバーと同じ

Fig. 9 可撓中空金属導波路形CO₂レーザーメス（水平方式） Fig. 10 可撓中空金属導波路形CO₂レーザーメス（垂直方式）の概念図

様な方式で空気をコアとして、クラッドに空気より屈折率の低い材料（ほとんど全ての酸化物

Fig. 11 可撓中空金属導波路形 CO₂ レーザーメス
(垂直方式)

ガラス)を用いたもので、結局、屈折率が1より小さい材料で作った円筒パイプである。具体的な材料として、二酸化ゲルマニウム (GeO₂) に K₂O と ZnO を添加したガラスを用いている。80% GeO₂-10% ZnO -10% K₂O ガラスで構成した口径 1 mmφ の中空導波路の伝送損失は現状では約 40% / m で理論値より 1 桁以上悪いが、製作方法など改善策が検討されている。新しい発想に基づくもので注目を集めている。

また、中空ニッケル管の内壁に Ge を内装した誘電体内装中空導波路が東北大・電気通信研究所で開発されている (Fig. 12)^{43, 44)}。この製作法はアルミ管を母材として、その外面に Ge を蒸着し、さらにその外側にニッケルをメッキした後、母材となったアルミ管をエッチングによって除去して、Ge 内装ニッケル中空管を得るものである。管径 1.5 mmφ、ニッケル層厚 約 0.2 mm、Ge 層厚 0.5 μm、長さ 1 m の中空導波

Fig. 12 誘電体内装中空導波路

路で伝送率は約 92% が得られている。この導波路は現在のところ、曲げによる伝送率低下が大きい、材料の選択、製作法などが検討されており、その改善が期待されている。

5. おわりに

CO₂ レーザーを含む中間赤外域レーザー光は現在、光パワーとその吸収特性を利用して加工、医用に主として用いられるが、コヒーレンスを利用した通信、計測などにも有効である。したがって、この波長領域の導波技術の開発は長波長レーザー活用の観点から重要な課題である。

医用に限って考えると、CO₂ レーザーメスの導波路が現実の対象となり、高出力の伝送、十分な可撓性と安定性、さらに細径化などが要求されている。通信用光ファイバーに対する考え方と異なる点は伝送距離は短くてよいが、高出力を安定に伝送することである。医用で要求される理想像は近赤外、可視域に使われている光ファイバーと同様なもので、内視鏡的にも利用し得るものである。現状では未だその要求との開きは大きい、関係する研究者の努力によって材料、伝送路構造など、中間赤外域の高出力導波技術は次第に改善されるものと期待される。

参 考 文 献

- 1) 久保：医用レーザー入門 (オーム、東京、昭和60年) p. 153.
- 2) 杉山、末永ほか：レーザー学会第1回年次大会予稿集、(1981年1月) p. 152.
- 3) K. Yoshida et al.: Trans. of 4th Congress of the

- Inter. Soc. for Laser Surgery, Tokyo, Nov., 1981, p. 19-8.
- 4) 小谷：エレクトロニクス, **28** (1983) 1329.
- 5) D.A.Pinnow et al.: Appl. Phys. Lett., **33** (1978) 28.
- 6) 桜木, 小谷, 島田ほか：第42回応用物理学学会予稿集 (1981年, 秋) p. 237.
- 7) 筒井, 池戸, 石渡ほか：第30回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1983年, 春) p. 82.
- 8) 池戸, 石渡ほか：レーザー研究, **11** (1983) 834.
- 9) 可知, 木村ほか：第29回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1982年, 春) p. 105.
- 10) 佐藤, 熊沢, 岡田：文献(7) p. 81.
- 11) 木村, 可知ほか：第43回応用物理学学会予稿集 (1982年, 秋) p. 87.
- 12) 可知, 木村ほか：第31回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1984年, 春) p. 57.
- 13) 可知, 木村：第46回応用物理学学会予稿集 (1985年, 秋) p. 97.
- 14) 池戸, 岩渕ほか：文献(12).
- 15) 渡, 宮田ほか：第32回応用物理学関係連合講演会予稿集 (1985年, 春) p. 71.
- 16) 桜木, 小谷, 島田：文献(11) p. 88.
- 17) 筒井, 池戸, 石渡ほか：文献(7).
- 18) 可知, 木村：文献(13).
- 19) 高橋, 葭田, 横田：文献(11).
- 20) 高橋, 葭田, 横田：第45回応用物理学学会予稿集 (1984年, 秋) p. 49.
- 21) 日経マグロウヒル社：日経エレクトロニクス, N E レポート, No. 302 (1982) p. 99.
- 22) 大川, 高橋ほか：日本レーザー医学会誌, **5** (1985) No. 3, 285.
- 23) 河井, 持田ほか：文献(22), p. 289.
- 24) 三村：応用物理, **52** (1983) 311.
- 25) 三村, 太田：文献(9) p. 103.
- 26) 今川, 佐藤ほか：文献(7).
- 27) 金森, 照沼, 宮下：文献(11).
- 28) Y.Mimura et al.: J. Appl. Phys., **53** (1982) 5491.
- 29) 服部, 金森ほか：文献(20) p. 110.
- 30) 荒井, 桜木ほか：文献(22), p. 293.
- 31) E.Garmire et al.: Applied Optics, **15** (1976) 145.
- 32) E.Garmire et al.: Applied Physics Letters, **31** (1977) 92.
- 33) E.Garmire et al.: Applied Physics Letters, **34** (1979) 35.
- 34) E.Garmire et al.: IEEE J. Quantum Electron., **QE-16** (1980) 23.
- 35) 久保ほか：昭53電気関係学会関西支部連合大会予稿集 (1978年, 秋) G306.
- 36) U.Kubo et al.: 文献(3), p. 19-16.
- 37) U.Kubo et al.: Proc. of SPIE-Inter. Soc. for Opt. Engin., San Diego, Aug., 1984, p. 79.
- 38) 橋新, 久保：文献(22), p. 273.
- 39) 橋新, 久保：レーザー学会研究会報告, RTM-85-24 (1985).
- 40) T. Hidaka et al.: J. Appl. Phys., **53** (1982) 5484.
- 41) 日高：レーザー研究, **12** (1984) 5.
- 42) 日高：オプトロニクス, **33** (1984) 48.
- 43) M.Miyagi: Appl. Phys. Lett., **43** (1983) 430.
- 44) 宮城：レーザー研究, **11** (1983) 845.