

# 大出力CO<sub>2</sub>レーザの共振器設計

—波動シミュレーションによるビーム品質の評価—

北海道大学工学部 ○原 聡 熊本敏明 柴田隆行 高橋義美 牧野英司 池田正幸

## 要旨

大出力CO<sub>2</sub>レーザ共振器の発振ビームモードについて波動シミュレーションを行い、高集光性・高パワー密度のビームを導出する共振器構成について理論検討を行った。その結果、大曲率半径型共振器を用いることにより、高品質ビームを導出できることがわかった。

### 1. はじめに

大出力CO<sub>2</sub>レーザは各種材料の切断・溶接等に幅広い適用分野を持っているが、一般には、マルチモードあるいはリングモード発振であるため、セラミックスの加工等に要求される大出力・高エネルギー密度ビームの実現にはまだ課題を残している。本研究では、波動シミュレーションによりレーザ共振器の発振ビームモードについて計算を行い、大出力でパワー密度の高いビームを発振するような共振器構成について検討した。

### 2. 計算モデルの仮定および計算方法

共振器構成には図1のPositive-Branch(PB)と図2のNegative-Branch(NB)を用いた。いずれも、全反射ミラーと、中央に部分反射部(反射率R)を持ちその周囲が無反射となっている結合ミラー<sup>1)</sup>(部分反射部の径と無反射部の径の比を拡大率Mと呼ぶ)で構成されている。ミラー曲率は、PBには共焦点条件<sup>2)</sup>により決められるものを、NBにはPBと同様に共焦点条件で決められるものと共振器長Lの10倍の曲率を持つ大曲率半径型の2種類を用いた。両ミラー前面には半径a<sub>0</sub>の開口を配置した。ゲインは均一広がりをした可飽和なものとし、ゲインシートをミラー直前に仮定することによってゲイン分布を二次元的にモデル化した<sup>1)</sup>。

ビームモードの計算にはFox-Liの繰返し回折計算法を用いた。

基本式としてFresnel-Kirchhoffの回折積分式

$$U_p(r_p) = \exp(\sqrt{g}L) \int_{|r_i| \leq a_0} \frac{U_i(r_i) \exp(\sqrt{g}L) \exp(-jk\sqrt{|r_i - r_p|^2 + L^2})}{-j\lambda\sqrt{|r_i - r_p|^2 + L^2}} dr_i \quad (1)$$

を用いた。ここで、U<sub>i</sub>、U<sub>p</sub>は全反射ミラーおよび結合ミラー面上の場、λは波長、gLは強度ゲイン、k=2π/λである。また、場U(r)と光強度I(r)および位相P(r)には、

$$I(r) = |U(r)|^2, \quad P(r) = \tan^{-1}(\text{Im } U(r) / \text{Re } U(r)) \quad (2)$$

という関係式が成り立つ。(1)式を用いて対向ミラー面上の分布を繰返し求め、場が定常となったところで共振器内のビームモードを確定した。さらに、ビームがミラーを通過した直後の分布を近視野像、十分遠方で伝播したときの分布を遠視野像、遠視野に集光レンズを仮定しその焦点面で得た分布を焦点面分布として、それぞれ計算を行った。また焦点面においては、平面波集光により定義されるAiry Diskの半径<sup>3)</sup>内に含まれるパワーの割合をビーム品質度Qとしてビームの集光性を評価し、同時にパワー密度の計算を行った。計算条件を表1に示す。なお、場が収束しない条件では安定な発振をしていないものとみなして検討から除外した。

### 3. 計算結果および考察

#### 3.1 ミラー曲率の検討

上述の3種類の共振器構成について計算を行ったところ、NBの共焦点型について定常な場を得るにはビーム半径を3mm以下にする必要があり、ビームパワーは極端に低くなった。そこで、NBの共焦点型を検討から外し残り

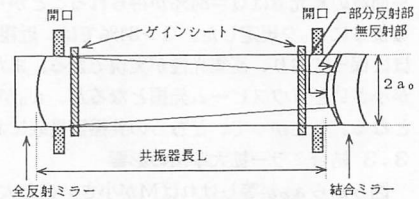


図1. PB型共振器

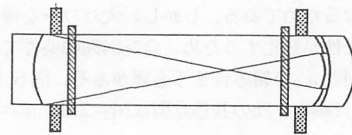


図2. NB型共振器

表1 計算条件

共振器長 L	2.506 [m]
開口半径 a <sub>0</sub>	4~15 [mm]
結合ミラー反射率 R	30~100[%]
結合ミラー拡大率 M	1.0~2.5
放電電力 W	20 [kW]

の2種類について、検討を行った。

### 3.2 開口半径 $a_0$ の影響

図3、図4は  $a_0$  が9mmおよび15mmのときのPBの共焦点型における近視野および遠視野強度分布である。 $a_0$  が大きくなると近視野像はガウスモードからマルチモードに移り遠視野像が乱れてくる。図5に  $a_0$  と  $Q$  および焦点面パワー密度の関係を示す。白抜きの点が大曲率半径型を表わしている。

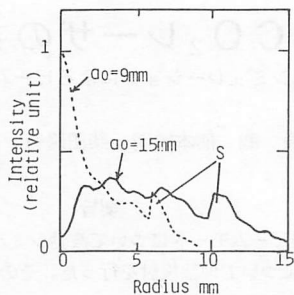


図3. 近視野強度分布

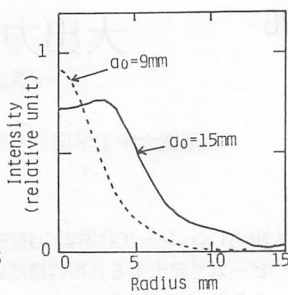


図4. 遠視野強度分布

$a_0$  に対する両共振器構成のパワー密度はほぼ等しかったため同一曲線上に表現した。 $a_0$

を大きくするとパワー密度は増加する。これは結合ミラーの部分反射領域が大きくなり共振器内のビームを大断面積化できるためである。一方、 $Q$  は  $a_0$  の増加の伴い悪化する。これは近視野像のマルチモード遷移により伝播特性が悪化し(図4)、集光性が悪くなるためである。平面波の集光では  $Q=84\%$  が得られることからここでは  $Q>84\%$  となるように  $a_0$  を規定した。 $Q>84\%$  では、近視野像はガウスモードをほぼ保っており、高集光性が実現できる。また大曲率半径型では、 $a_0$  が小さいとガウスビーム発振となるが、 $a_0$  が大きくなると不安定発振となる。したがって、どちらの共振器構成においても  $a_0$  には上限がある。

### 3.3 結合ミラー拡大率 $M$ の影響

図5から  $a_0$  が等しければ  $M$  が小さいほど大きなパワーが得られることがわかる。これは、 $M$  が小さくなると結合ミラーの部分反射領域が大きくなるためである。しかし、大パワーを得るために  $a_0$  を大きくすると集光性が悪化するため、 $Q>84\%$  の条件でパワー密度が最大になるように  $M$  と  $a_0$  を組み合わせる必要がある。図5より大曲率半径型は  $M=2.0$ 、 $a_0=11\text{mm}$  を、PBの共焦点型は  $M=2.5$ 、 $a_0=12\text{mm}$  を各共振器構成の最適値とした。

### 3.4 結合ミラー反射率 $R$ の影響

図6に上述の両最適値における  $R$  と  $Q$  および焦点面パワー密度の関係を示す。 $R$  の増加に伴いパワーは大きくなるが  $Q$  は逆に低下する。これは、 $R$  が大きくなると共振器内光強度の増加のため出力は大きくなるが、それに伴う近視野像の強度ステップ(図3中のS)による回折光の影響で集光性は悪化するためである。両最適値を比較すると、大曲率半径型の方が  $R$  の増加に対して高品質・高パワー密度が得られていることがわかる。アライメント等の調整は大曲率半径型の方が容易なことも考慮し、ここでは大曲率半径型を採用する。この場合、 $R$  が90%以下では  $Q$  はほぼ一定で高集光性が得られていることから、 $R=90\%$  を最適値とする。

### 4. まとめ

共振器構成の最適化を行った結果、高品質ビーム導出の条件は、大曲率半径型(両ミラー曲率半径が共振器長の10倍)で、開口半径が11mm、結合ミラーの拡大率が2.0、反射率が90%であることがわかった。

### 参考文献

- 1) 安井治: 学位論文「高出力  $\text{CO}_2$  レーザの高性能化の研究」p56~60
- 2) 秋葉稔光: 「レーザ技術読本」日刊工業新聞社(1985) p108~109
- 3) 高岡 隆、高橋 忠: 「レーザ技術入門」秋葉出版(1986) p91~94

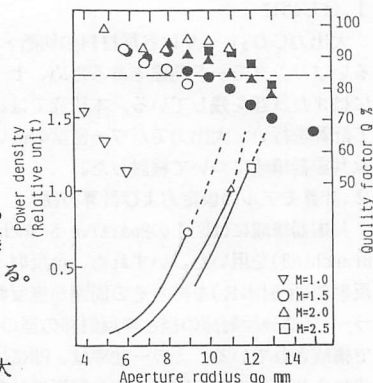


図5. 開口半径  $a_0$  とビーム品質  $Q$  および焦点面パワー密度の関係

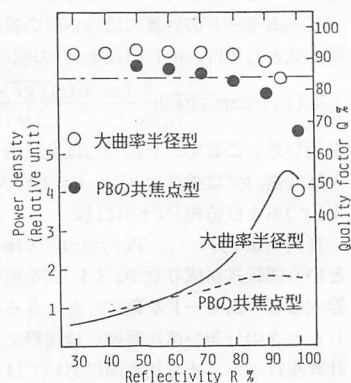


図6. 反射率  $R$  とビーム品質  $Q$  および焦点面パワー密度の関係