レーザーオリジナル

CO₂レーザービームの集光特性に与える
透過光学鏡の熱歪の影響

松原 真人*・竹中 裕司**・西前 順一**・葛本 昌樹**

(1994年2月25日 受理)

Effects of Optical Distortion on Focusing Characteristics of CO₂ LaserMasato MATSUBARA*, Yushi TAKENAKA**
Jun-ichi NISHIMAE** and Masaki KUZUMOTO**

(Received February 25, 1994)

Focusing characteristics of CO₂ laser beam affected by an optical distortion are calculated for a Gaussian mode and higher order modes using computer simulation, which gives a theoretical dependence of the optical distortion on the transverse intensity profiles. The theoretical results show that the beam with higher intensity at a center region gives more serious distortion effect for focusing than the beam with lower intensity at a center region.

Key Words: CO₂ Laser, Optical distortion, Transverse mode, Wave optics, Focus

1. まえがき

光共振器を構成する出力ミラーや集光レンズなどの透過光学素子では、吸収率が大きい場合レーザービームの集光特性が劣化する。特に高出力レーザーではこの影響が顕著になり、例えば高精度安定加工が要求されるCO₂レーザー加工においては、吸収率の増加による集光特性の劣化は高品質加工の妨げとなる。

このような透過光学素子の吸収率の増加によるレーザービームの集光特性の劣化は、径方向の温度分布に起因する熱膨張による光学素子の

形状変化と、屈折率の分布により引き起こされる^{1,2)}。これらは一般に“熱歪の影響”と呼ばれ、これまで熱歪による焦点距離の変化や収差によるガウスビームの集光における軸上強度の低下等について検討されている^{3~5)}。

ところでCO₂レーザーでは、透過光学素子には一般にZnSeが用いられており、ZnSeが持つ固有の吸収率の他、表面に不純物が付着することによる吸収率の増加は実用上避けられない。また透過光学素子の冷却は外周部で間接水冷されることが多く、中心部の強度が高いガウスビームの場合、透過光学素子の中心部の温度は

*三菱電機株式会社名古屋製作所(〒461 名古屋市東区矢田南5-1-14)

**三菱電機株式会社中央研究所 (〒661 尼崎市塚口本町8-1-1)

*Nagoya Works, Mitsubishi Electric Corporation (1-14, Yada-minami, Higashiku, Nagoya, Aichi 461)

**Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corporation (1-1, Tsukaguchi-Honmachi, 8-chome, Amagasaki, Hyogo 661)

かなり高くなり、吸収率の増加と共に熱歪の影響も大きくなる。このような透過光学素子の径方向の温度分布の偏りをなくすために、例えば透過光学素子の表面に溝加工を施して中央部の対流冷却を外周部の冷却と併用することにより、中央部の温度を下げ熱歪の影響を小さくした例も報告されている⁶⁾。一方、径方向の温度分布は、レーザービームの強度分布すなわちビームの横モード(以下モード)に強く依存する。したがって透過光学素子の温度分布と密接な関係をもつ熱歪の影響は、ビームのモードによって大きく異なることが予想されるが、これまでにモードと熱歪の関係を詳細に解析した例は報告されていない。

本論文では、CO₂レーザーにおいて透過光学素子の温度分布をいくつかの低次モードについて解析的に求め、熱歪の影響によるレーザービームの集光特性の変化を波動計算により定量的に評価し、レーザービームの強度分布すなわちモードによる熱歪の影響の違いを明らかにした。

2. 透過光学鏡の温度分布

透過光学鏡への入熱に関する概念モデルをFig. 1に示す。ここではCO₂レーザー用光共振器を構成する部分反射(Partial Reflection)ミラーについて検討する。PRミラーは、1.5"φ×6 mm(曲率は無視)のZnSe製とし、ビーム入射側に30 %PR膜、出射側に無反射(Anti Reflection)膜が施されているとする。冷却は、ホルダーとミラーとの接触部分(Fig. 1斜線部)での間接水冷のみとする。通常CO₂レーザー装置は減圧化で使用されPRミラーには出力側から大気圧がかかるが、ここではミラー両面の圧力差による変形は考慮しない。

上記の概念モデルに従い、透過光学鏡の温度分布を計算する。透過光学鏡の温度分布は次の基本方程式の解として与えられる⁷⁾。

$$\kappa \nabla^2 T + \alpha I = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 T : 透過光学鏡の温度、 α : 吸収率、 κ :

Table I Definition of the absorptions at the partial reflector.

bulk absorption	β_b	0.050 %cm ⁻¹
PR absorption	α_{PR}	0.040 %
AR absorption	α_{AR}	0.080 %
total absorption	α_T	0.12 %

熱伝導率、 c : 比熱、 ρ : 密度、 I : ビーム強度である。計算は、厚み方向の温度勾配を無視し、2次元の熱伝導方程式を解くことにより行ない、また熱伝導率は温度によらず一定とする。ZnSeミラーの10.6 μm(CO₂レーザー)光に対する代表的な吸収率の値をTable Iにまとめる。厳密には各部分での吸収を別々に考慮する必要があるが、ここでは(1)式で定義される全吸収率 α_T を用いて、ミラー内で一様に発熱すると仮定する。(2)式において、PR面吸収率 α_{PR} 及び全吸収率 α_T にかかる係数($P/0.7$)は、PR面に入射するパワー(P : 出射パワー)を示し、バルク吸収率 β_b にかかる係数(0.6)はミラーの厚みを表す。従って、(2)式で定義される全吸収率 α_T は入射パワーに対する吸収率を示す。

$$\frac{P}{0.7} \alpha_{PR} + P(0.6 \beta_b + \alpha_{AR}) = \frac{P}{0.7} \alpha_T \quad (2)$$

透過光学鏡への入射ビームは、Fig. 2に示す強度分布を持つLaguerre-GaussモードのTEM₀₀(ガウス)モード、TEM₀₁* (リング)モード、TEM₁₀モード、TEM₁₁* (リング)モードとする。なおTEM₀₁* (リング)モードは、Laguerre-Gaussian(もしくは Hermite-Gaussian)のTEM₀₁モードが角度方向に重ね合わされたものとし⁸⁾、TEM₀₁* (リング)モードの強度分布としてLaguerre-GaussianのTEM₀₁モードを用いた。TEM₁₁* (リング)モードの強度分布についても同様に、Laguerre-GaussianのTEM₁₁モードを用いた。またビーム径は最も外側のピーク強度の1/e²の強度に対応する径で、それぞれ13.9, 20.7, 26.6, 30.2 mm φである。これは同一発振器構成でTEM₀₀モード

Fig. 1 Absorption of laser radiation in the partial reflector.

Fig. 2 Beam intensity profile for (a) TEM₀₀, TEM₀₁* and (b) TEM₁₀, TEM₁₁* Laguerre-Gaussian modes.

の $1/e^2$ 径の1倍, 1.5倍, 1.91倍, 及び2.17倍に相当する⁹⁾。

透過光学鏡内部での発熱量が, 2.7 W (レーザー出力 $P=1600$ W, 全吸収率 $\alpha_T=0.12\%$)の

Fig. 3 Temperature distributions of the partial reflector for the four lowest-order Laguerre-Gaussian modes which are calculated analytically.

場合の温度分布の定常解(冷却されている周辺部を基準とした)をFig. 3に示す。本検討では, モード次数が低いほどビーム径が小さいと仮定しているため, 低次モードほどミラー中央部温度が高くなるという妥当な結果である。ただしビーム中央部に強い強度をもつTEM₁₀モードと中心部に強度をもたないTEM₀₁*モードにおけるミラー中央部温度を比較すると, ビーム径が異なるにも係わらず, ほぼ同様の中心温度を示していることに注目したい。

3. 透過光学鏡の位相分布

前節で求めたミラー径 r 方向の温度分布 $T(r)$ から, 透過光学鏡の厚さ l , 屈折率 n の分布を求める。 $n(r)$, $l(r)$ はそれぞれ次式で評価した。

$$n(r) = \frac{dn}{dT} (T(r) - T_0) + n_0 \quad (3)$$

$$l(r) = (1 + \nu) l_0 \hat{l} (T(r) - T_0) + l_0 \quad (4)$$

ただし, n_0 : ZnSeの屈折率2.4, l_0 : ミラー厚さ6 mm, ν : ポアソン比 0.28 $dn/dT = 6.4 \times 10^{-5}$ [K⁻¹], $\hat{l}$: 線熱膨張係数 8.5×10^{-6} [K⁻¹]¹⁰⁾である。

つぎに l , n の分布より, 透過光学鏡の与える位相分布を求める。Fig. 4より透過光学鏡の与える位相分布は面1と面2の間の位相の変化と

Fig. 4 Phase variation of the beam passing through the optically distorted mirror.

Fig. 5 Phase distribution at a reference plane 2 in a case of TEM₀₀ mode.

して与えられるので、ミラー表面における光線屈折の影響は小さいとして無視すると、透過光学鏡の与える位相分布は次式で与えられる。ここで、 χ は光学歪係数¹¹⁾である。

$$\begin{aligned}\phi(r) &= -\frac{2\pi}{\lambda} [n(r) \cdot l(r) + (l_{\text{MAX}} - l(r))] \\ &= -\frac{2\pi}{\lambda} [l_0 \chi (T(r) - T_0) + l_{\text{MAX}}] \quad (5)\end{aligned}$$

$$\chi = \frac{dn}{dT} + (n-1)(1+\nu)\hat{l} \quad (6)$$

入射波をガウスビームの平面波とした時の、内部発熱量2.7 Wの場合の面2での位相分布をFig. 5に示す。ただし、Fig. 5ではミラー径方向

の位相の変化を、中心部($r=0$)における位相との差で表し、値が大きい程位相が進むことを示している。Fig. 5よりミラー外周ほど位相が進み、いわゆる凸レンズになっていることがわかる。

4. 波動計算と計算モデル

波動計算は円筒座標系でのフレネル積分により行なった。自由伝搬でのフレネル積分は次式で与えられる¹²⁾。

$$\begin{aligned}u_2(r_2, z) &= \frac{2\pi j^{m+1}}{z\lambda} \int_0^d u_1(r_1, 0) \\ &\exp \left[\frac{-j\pi}{z\lambda} (r_1^2 + r_2^2) \right] J_m \left(\frac{2\pi r_1 r_2}{z\lambda} \right) r_1 dr_1 \quad (7)\end{aligned}$$

ここで、 $u_1(r_1, 0)$: 入射面での光電場、 $u_2(r_2, z)$: 観測面での光電場、 J_m : 第1種 m 次のベッセル関数、 λ : 波長、 k : 波数、 d : ミラー半径、 z : 入射面から観測面までの光軸上での距離である。

またビーム強度は

$$I(r_2, z) = |u(r_2, z)|^2 \quad (8)$$

により求められる。

今回の計算に用いた波動計算モデルをFig. 6に示す。透過光学鏡への入射波は平面波とし、透過光学鏡通過後のビームを理想レンズ(焦点距離 $f=7.5$ インチ)で集光する。波動計算では、入射波 $u_1(r_1, 0)$ は透過光学鏡通過後の波で、前節で計算した位相分布をもつ。また観測面は焦点位置とする(Fig. 6で Δz はレンズの焦点距離からのずれ量とする)。なお焦点位置はピーク強度が最大の位置で定義する。

透過光学鏡への入射ビームのモードは、2節で述べたLaguerre-GaussモードのTEM₀₀(ガウス)モード、TEM₀₁* (リング)モード、TEM₁₀モード、TEM₁₁* (リング)モードとする。

5. 波動計算結果

4節で述べた波動計算モデルに従い、透過光

学鏡の内部発熱量を変化させて熱歪の影響を、低次モードについて波動計算により評価する。評価項目としては、次の3つのものについて検討を行なう。

- 1) 焦点位置の移動量
- 2) M^2 値の変化
- 3) 焦点近傍の等強度線分布の変化

ここで、 M^2 値はレーザービームの品質すな

Fig. 6 Transmission of the plane wave for each mode passing through the optically distorted mirror, and focusing by the ideal lens.

Fig. 7 Intensity distributions computed by the Fresnel integrals, Equation (6), with absorbed power in the partial reflector as parameters, for (a) TEM_{00} , (b) TEM_{01}^* , (c) TEM_{10} , (d) TEM_{11}^* modes.

わち集光性能を定量化したもので、 TEM_{00} (ガウス)モードの回折限界ビームの集光性能を1としたときに、その他のビームの集光性能をその相対値で表したものである^{9,13,14})。 M^2 値が大きいほどビームの集光性能は悪くなる。

Fig. 7に焦点位置での強度分布の計算結果を、それぞれのモードについて示す。内部発熱量の増大に対して、集光ビームの周辺部にエネルギーが分散することがわかる。ここで TEM_{01}^* モードの集光特性の変化が小さいことが大きな特徴である。

5.1 焦点位置の移動量

内部発熱量の増加による焦点位置の変化をFig. 8に示す。焦点位置の変化 Δz は、入射ビームを円形均一ビームとしたときに f^2 (f : 集光レンズの焦点距離)に比例するため³⁾、Fig. 8では Δz を f^2 で規格化した。Fig. 8よりモード次数が高くなるほど熱歪による焦点位置の移動量は小さくなっている。これはモード次数が高くなるほどビーム径が大きくなり、ビームの平均エネルギー密度が小さくなるためと考えられる。

5.2 M^2 値の変化

内部発熱量の増加による M^2 値の変化をFig. 9に示す。なお M^2 値を評価する際のビーム径は、全パワーの86.5%を含む径で定義した。また内部発熱量がゼロの時の M^2 値は、熱歪の影響がないときの値であり、それぞれのモードがもつ本来の集光特性を示す。すなわちモード次数が大きくなるほど M^2 値は大きくなり集光特性は悪くなる。

Fig. 9より TEM_{00} , TEM_{10} モードは内部発熱量の増加による M^2 値の変化が大きく、 TEM_{01}^* , TEM_{11}^* モードは内部発熱量の増加による M^2 値の変化は小さい。これは TEM_{00} , TEM_{10} モードのような中心部に高いエネルギー密度を有するモードは熱歪によるビームの集光特性劣化が大きく、一方中心部のエネルギー密度が低い TEM_{01}^* , TEM_{11}^* モードでは熱歪による集光特性の相対的劣化は小さいと考

Fig. 8 Calculated variation of focus versus absorbed power in the partial reflector for the modes.

Fig. 9 Calculated beam quality factor versus absorbed power in the partial reflector for the modes.

えられる。

5.3 焦点近傍の等強度線分布の変化

Fig. 10は TEM_{00} モードおよび TEM_{01}^* モードの焦点近傍の等強度線分布を示した図である。横軸はレンズの焦点位置をゼロとした時の値であり、マイナスはレンズ側への距離であることを示す。レーザー出力は1600 W, 吸収率は0.2%の場合である。この結果より TEM_{00} モードでは、熱歪の影響により低い強度の等強度線に乱れが生じ、一方 TEM_{01}^* モードでは熱歪による影響はあまりみられない。また熱歪による焦点位置の移動も TEM_{01}^* モードよりも TEM_{00} モードの方が大きい。

Fig. 10 Contour of the beam intensity at laser output power 1600 W near the focus point for (a) TEM₀₀, (b) TEM₀₁* modes, where total absorption is 0.2 % and focal length is 7.5 inch.

6. 結論

透過光学素子の熱歪の影響によるレーザービームの集光特性の変化を、波動計算により定量的に検討し、レーザービームの強度分布すなわちビームモードによる集光特性の変化を明らかにした。得られた結論を以下に挙げる。

(1) TEM₀₀, TEM₁₀モードのようなビーム中央

部に高いエネルギー密度を有するモードは熱歪による集光特性の劣化が大きく、TEM₀₁*、TEM₁₁*モードのようなビーム中央部のエネルギー密度が低いモードは熱歪による集光特性の劣化は小さい。

(2) 熱歪の影響を受けたレーザービームの集光点近傍における強度分布の変化を波動計算により求めた。熱歪の影響により、集光点近傍で低い強度領域の分布が大きく変化し、この現象はTEM₀₀モードにおいて顕著に現われ、TEM₀₁*モードでは変化は小さいことが明らかになった。

参 考 文 献

- 1) M. Sparks: J. Appl. Phys. 42 (1971) 5029.
- 2) D. J. Dyson: *The Physics and Technology of Laser Resonators* (D. R. Hall and P. E. Jackson, Eds. New York: Adam Hilger, 1989) Chap.13.
- 3) 丸尾大, 宮本勇: 溶接学会論文集 10 (1992) 20.
- 4) I. Miyamoto, H. Nanba, and H. Maruo: *Proc. SPIE. CO₂ Lasers and Applications II* 1276 (1990) 112.
- 5) C. Langhorn and R. Gruhlke: *Laser Focus* 29 (1993) 89.
- 6) D. Tanimoto, E. Danielewicz, G. Sherman, and P. Muys: *Proc. LAMP. Science and Applications* 1 (1992) 185.
- 7) H. S. Carslaw and J. C. Jaeger: *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed. (Oxford University Press, London, 1959) Chap.2.
- 8) A. E. Siegman: *Lasers* (Mill Valley CA, Univ. Sci., 1986).
- 9) M. W. Sasnett: *The Physics and Technology of Laser Resonators* (D. R. Hall and P. E. Jackson, Eds. New York: Adam Hilger, 1989) Chap.9.
- 10) 例えば、レーザー学会編: レーザーハンドブック (オーム社, 東京, 1982) p.397.
- 11) T. F. Deutsch: J. Electronic Materials 4 (1975) 663.
- 12) A. G. Fox and T. Lie: *Bell Sys. Tec. J.* 40 (1961) 453.
- 13) A. E. Siegman: *Proc. SPIE. Optical Resonators* 1224 (1990) 2.
- 14) A. E. Siegman, M. W. Sasnett, and T. F. Johnston Jr.: *IEEE J. Quantum Electron* 27 (1991) 1098.