レーザを用いた表面硬化における熱源の影響(第2報)*

——ガウス型分布熱源とドーナツ型分布熱源——

川 澄 博 通** 新 井 武 二**

Studies on Surface Hardening with CO₂ Laser
(2nd Report)—On the Effect of Heat Source Pattern of
Gaussian and Doughnut Beam to the
Laser Hardening—

Hiromichi KAWASUMI and Takeji ARAI

The effect of heat source pattern (beam mode) was studied on the metal surface hardening with CO₂ laser. In this report, the comparison of Gaussian source (TEM₀₀ mode) with the source of Doughnut beam (TEM₀₁* mode) was investigated through the heat conduction theory. Assuming that a linear relationship exists among the equations, in the

source of Doughnut mode, the approximate eq. (4) is very close to the heat source pattern. Calculations show that the isothermal line of the source of Doughnut beam is deeper and wider than Gaussian source to transform the austenite to the martensite. The source of Doughnut beam, in optimum laser hardening condition, can get longer heating time to transformation than Gaussian source, and higher quality or finer martensite is obtained.

Key words: heat treatment, surface treatment, surface hardening, heat conduction, laser heat source, laser hardening, laser machining, laser processing, high power laser, heat source pattern, laser beam mode, carbon dioxide laser.

1. 緒 論

レーザ焼入れにおける熱源の影響を比較する目的で、ガウス型分布熱源とドーナツ型分布熱源について行った実験と計算値について報告する。ガウス型分布熱源とは、一般に軸流型レーザ加工装置においてよく得られる熱源形状で、中心部でエネルギー密度が最も高く、周辺にゆくに従ってガウスの誤差曲線に従って漸次エネルギー密度が低くなってゆくもので、この熱源となるビームモードは通常シングルモードまたはTEM₀₀モードと呼ばれている。ドーナツ型分布熱源は、ドーナツを円環を含む平面で切断したような形状を呈し、輪状にエネルギー強度が分布していることから名付けられたもので、熱源のビームモードはTEM₀₁*モードと呼ばれている。この形状のものは、軸流型レーザ装置の鏡の形状の改造や曲率半径の選択によって取り出されるもので、まだ理論的に設計し難い面も含んでいるため、今日では光学系を用いて輪状のレーザ光を取り出すことも考案されている¹⁾²⁾。

表面硬化法にガウス型分布熱源を用いた場合、表面を金属の熔融温度以下におさえようすると変態点以上に滞留する時間と焼入れ可能な深さおよび幅が限定されて

くる。これに対してドーナツ型分布熱源は、熱源の中心のピークが取り除かれた輪状であるため、それが移動するとまず前方の熱源で加熱され変態点以上に昇温し、ビームの移動に伴い冷却されるが、更に後方の熱源によって加熱され変態点以上で且つ熔融温度以下の温度範囲で再び昇温する。後方の熱源の通過によって自然冷却が始まり、自己焼入れが行われる。また輪状の中心よりやや外れた部分もほどよく加熱され変態する。このためドーナツ型分布熱源では、変態点以上に滞留する時間も増加し、焼入れ性が向上すること等が確認された。本報では、ガウス型分布熱源とドーナツ型分布熱源を数学的に近似する方法で熱伝導論的に比較計算し、その最適性を検討した。

2. エネルギー分布形状

それぞれの熱源のエネルギー分布の状態を観察するために、その目安の一方法として広く用いられている方法、すなわちアクリル板にダイレクトビームを短時間照射して得られるバーンパターンによって比較検討した。

2.1 ガウス型分布熱源

一般にシングルモードは、中心部のピークが鋭く、しかも高い。また、その裾の傾斜もよりシャープとなる。このようなビーム形状は、主として切断に適している。装置のレーザ発振方式、光学系、ビーム調整技術等によっても異なるが、実際に実験等で得られる“シングルモード”の形状はガウス分布の数学的表現によくあてはま

* 原稿受付 昭和55年11月4日。昭和54年度精機学会春季大会学術講演会(昭和54年3月30日)および昭和54年度精機学会秋季大会シンポジウム(昭和54年10月11日)にて発表。

** 正会員 中央大学理工学部(東京都文京区春日1-13-12)

(a) ガウス型ビームモードの場合のアクリルのバーンパターン

(b) 石膏でバーンパターンのレプリカをとったもの

図1

(a) ドーナツ型ビームモードの石膏によるレプリカ

(b) 断面切断写真

図2

る。図1にそのガウス型分布熱源によるバーンパターンの一例を示す。

2.2 ドーナツ型分布熱源

軸流型レーザー発振装置(共振器長約7m)を用い、リアミラーの曲率半径を20mにすることによって得られたドーナツ型のバーンパターンの一例を図2(a)に示す。ガウス型の中心部分にあたるところが欠如した形を呈している。形状を明確にするために、アクリル板の蒸

G.S.: TEM₀₀

図3 ガウス型分布熱源

発した部分(クレータ)に石膏をつめて固め、そのレプリカをとったものである。これはビームからみた場合、ほぼもとのエネルギー強度分布形状となっている。図2(b)に、その中心を切断したものを示す。断面は明確な区分をするために色彩が施された。ほぼ中心の抜けた輪状の熱源であることがわかる。二つの山の中心は、エルミート多項式等の理論³⁾よりやや内側寄りの傾向にある。したがって、実際のものに合わせるために、得られた熱源形状になるべく近いような数学的モデルを採用した。

3. 熱伝導論的考察

前報⁴⁾と同様の仮定を用い、定常状態においてエネルギー密度分布 $w(x', y')$ が材料表面に発生し、一定速度 v で x 軸に平行移動するとき、加熱される物体の内部の点 (x, y, z) における温度上昇は次式で与えられる⁵⁾。

$$\theta = \frac{A\alpha}{4K(\pi\alpha)^{3/2}} \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_{-\infty}^\infty \frac{w(x', y')}{\sqrt{t^3}} e^{-\frac{(x-x'+vt)^2 + (y-y')^2 + z^2}{4\alpha t}} \times dx'dy'dt' \quad (1)$$

ここで、 A はビーム吸収率、 K は熱伝導率(W/cm°C)、 α は熱拡散率(cm²/s)を示す。

3.1 ガウス型分布熱源

熱源をほぼ真円と仮定した場合のガウス分布のエネルギー分布 $w(x', y')$ は次式で与えられる(図3)。

$$w_G(x', y') = \frac{W}{\pi a^2} e^{-\frac{x'^2 + y'^2}{a^2}} \quad (2)$$

ここで、 W は出力(W)、 a は熱源幅とする。これを式(1)に代入して計算すると次式を得る。

$$\theta = \frac{AW}{Kr\sqrt{\pi^3}} \int_0^\infty e^{-\frac{(X+Up)^2 + Y^2}{r^2 + p^2} - \frac{Z_0^2}{p^2}} \frac{dp}{\mathfrak{R}^2 + p^2} \quad (3)$$

ここで、 $X=x/r$, $Y=y/r$, $Z_0=z/r$, $\mathfrak{R}=a/r$, $U=vr/4\alpha$, $4\alpha t=p^2 r^2$, r はスポット半径(cm)とする。

3.2 ドーナツ型分布熱源

方程式が線形であると仮定し、ビームのスポットサイズにおける定義同様、温度の最大値の $1/e^2$ となる半径

図4 ドーナツ型分布熱源の数学的近似

図5 ドーナツ型分布熱源

を温度分布のスポットサイズと定義すれば、ドーナツ型分布熱源は、実験で得られたエネルギー分布曲線に合わせて、ガウス分布熱源を用いて次のように近似することができる(図4)。

$$\theta_D = \theta_G - \theta_{G'} \quad (4)$$

すなわち、式(3)で求められるガウス型分布熱源を用いて、まずビーム径に適したガウス型分布熱源 $[\theta_G]$ を求め、次に中心の除かれている部分を小さいガウス型分布熱源 $[\theta_{G'}]$ に置き換え、数学的に取り除く方法でドーナツ型分布熱源をモデル化した。

ドーナツ型分布熱源(図5)におけるエネルギー分布 $w(x', y')$ は次のように示される(但し、 $m > 1$)。

$$w_D(x', y') = I_0 \left\{ e^{-\frac{x'^2 + y'^2}{(ma)^2}} - e^{-\frac{x'^2 + y'^2}{a^2}} \right\} \quad (5)$$

以下、上述の近似に従って計算した。

4. 計算結果

レンズで集光されたレーザビームのスポット径はビームモードをガウス型(TEM₀₀)と仮定した場合、その最大値の $1/e^2$ となる位置における径 d とする。そのとき d は簡易に次式で近似される⁶⁾⁷⁾。

$$d = \frac{D_0}{f} \cdot z \quad (6)$$

ここで、 D_0 は平行ビームの $1/e^2$ となる径、 f はレンズの焦点距離、更に z は焦点外し量である。本実験におけるスポット径 d は約 $\phi 9.4$ mmであった。また、以下に

図6 ガウス型分布熱源での深さ方向の温度分布曲線

図7 ガウス型分布熱源でのx-y平面における温度分布

示す計算例は、すべて表面での最大温度が溶融点を越えないぎりぎりのところを上限温度と定めたときのもので、両者の比較もその観点から比較検討された。材料は炭素鋼を想定したもので、熱定数等の計算における仮定は前報⁴⁾と同様とする。

4.1 ガウス型分布熱源の場合

ガウス型分布熱源を用いて計算した結果の一例を示す。加工条件は、出力2 kW、送り速度1.5 m/min、レンズ焦点距離75 mm、焦点外し量70 mmで表面焼入れした場合で、図6は、 x - z 平面における温度分布である。原点に熱源中心があって一定速度 v で x 方向に平行に移動させたときの温度分布で、縦軸は温度で、パラメータ z は平面からの深さである。試料表面 $z=0$ で表面温度は最大となり、内部の温度は深さが増すと低下し、各曲線の最大の温度位置が後方に尾を引くようにずれている。

図7では、材料表面(x - y 平面)での温度分布を等温線で図示した。熱源は座標中央の円で、その内側を点線で示した。最大温度は熱源の後端部で起こり一定速度 v で移動しているため、等温線は後方に流れ、「卵」型を呈している。この等温線の850°C近辺の y 方向の最大のふくらみのところまで変態し、硬化幅を形成する。同じ加工条件で、 x - z 平面での温度分布状態を熱源の移動方向に図示したのが図8である。同様に、ビームの進行方向に垂直な断面、すなわち y - z 平面での温度分布を図9に

図8 ガウス型分布熱源での x - z 平面における温度分布

図11 ドーナツ型分布熱源での x - y 平面の温度分布

図9 ガウス型分布熱源での y - z 平面における温度分布

図12 ドーナツ型分布熱源での x - z 平面の温度分布

図10 ドーナツ型分布熱源での深さ方向の温度分布曲線

示す。この図から変態点以上の範囲を硬化層として断面の金属組織写真と対応することができる。

4.2 ドーナツ型分布熱源の場合

ドーナツ型分布熱源を用いて計算した場合の一例を示す。図10は、出力2kW、送り速度0.75m/minのときの x - z 平面での温度分布を示す。前述同様に y 軸に温度をとり、深さ方向 (z) をパラメータにとった。 $z=0$ は表面での温度分布を示す。熱源が x 軸方向に移動しているとき、輪状の熱源中心を原点にとったときの x 軸上でみた場合の温度分布状態を示した。前方の熱源によって変態点以上に加熱された素材は中間の熱源の空洞部分で一旦冷却されるが、再び後方の熱源によって昇温し、溶

融温度付近にまで達する。その後、熱源が移動するに従って自然冷却される。一旦空洞部分によって温度が下がる現象は、焦点外し量と送り速度によって変化する。また、深さ方向にゆくに従って、これらの起伏は小さくなり、材料の内部数mmのところではガウス型分布熱源を用いた場合と同じような温度分布となる。同じ条件で、 x - y 平面での温度分布を図11に示す。熱源内部で温度分布は複雑な分布を示すが、変態点を仮に850°Cとした場合でもガウス型分布熱源の場合に比べてその変態点以上の温度範囲が広がっていることがわかる。同様に、 x - z 平面での温度分布を図12に示す。前方熱源によって予熱が加えられ、後方の熱源によって昇温しているが、等温線の数百°Cとなる温度範囲では三次元的に熱が関与するため、あまり表面での温度の変化の状態の影響を受けずにほぼなだらかに変化している。図13には、ビームの進行方向に垂直な断面での温度 (y - z 平面) を示す。高温領域ではガウス型分布熱源より等温線が平坦で、広がりを持っている。また、深さ方向にゆくに従って、低温域の温度分布は矩形分布熱源⁴⁾に近い温度分布を示している。

4.3 両熱源の比較

ガウス型分布熱源とドーナツ型分布熱源を比較するために、両方とも同じアクリル板上で一定速度で走行させ

図13 ドーナツ型分布熱源での y - z 平面の温度分布

(a) ガウスビームを用いてアクリル板上を走行させて出来たバーンパターン

(b) ドーナツビームを用いてアクリル板上を走行させて出来たバーンパターン

加工条件: 出力 1kW, 送り速度 1 m/min
写真撮影のため断面は白色で塗られている

図14

てその形状を検討した(図14)。出力は 1kW, 材料の送り速度は 1.0 m/min とした。同一アクリル板上であるため蒸発温度は一定とみなすことができ、ビームの走行によって出来た溝(蒸発溝)は蒸発温度, すなわち等温線の一つと考えることができる。ドーナツモードの方が, ガウスモードに比べて全体に平坦になっている。また, 材料によってその量は異なるが, 中心でややくぼみを持ちドーナツ型分布形状の熱源が走行したときの特徴を示している。

図15には, 炭素鋼を想定した金属の表面焼入れの場合の計算結果の一例を示す。材料の表面温度が熔融する直前で最大の硬化層を得るように選ばれた条件での両熱源形状で, A_1 変態点を 850°C とした場合の等温線を比較した。その結果, ドーナツ型分布熱源の方がより大きい硬化深さおよび硬化幅を得ることができ, 硬化面積は約2倍以上増加し, 硬化部分が A_1 変態点以上に滞留する時間も2倍以上となることから, 焼入れのための熱源

図15 ガウス型分布熱源とドーナツ型分布熱源の硬化層の比較 (y - z 平面) 出力: 2kW, 送り速度: 2500mm/min (硬化深さ 0.6mm)
(a) ガウス型分布熱源による硬化例 出力: 2kW, 送り速度: 1500mm/min (硬化深さ 0.8mm)
(b) ドーナツ型分布熱源による硬化例

レンズ焦点距離 150 mm, 焦点外し量 70 mm とした場合の実験比較例

図16 表面硬化における両熱源の比較

としてはより優れていることが明らかとなった。実際に実験によって得られた結果を図16に示す。実験ではレンズの焦点距離を 150 mm, 焦点外し量は 70 mm とした。したがって, 計算例に示した条件(レンズ焦点距離 75 mm, 焦点外し量 70 mm 相当)よりも平均エネルギー密度が倍近く高くなることから, 最適加工条件下での材料の送り速度もそれに伴い相対的に速くなっている。照射面が平坦で表面溶融を起こしていない状態で比較すると, 出力 2kW でビーム形状がガウスモードの場合は, 送り速度が 2500 mm/min に対して, 硬化深さが約 0.6 mm, ドーナツモードの場合は, 送り速度が 1500 mm/min に対して, 硬化深さは 0.8 mm となり硬化深さで3割増となり, 結果的に計算例とはほぼ同様な結果を得た。

なお, これらの計算結果は表面にりん酸マンガン被膜処理を施した材料を想定し, 熱の吸収率を 80~85% とした場合の計算である。現在では, 種々の被膜処理, 黒化処理により, 例えば“カーボンブラック”の場合(スプレー塗布), 90~95%の吸収率の計算と一致する。金属の熱的反応は直線的比例関係ではなく, エネルギーパ

ワー密度、熱源の関与時間、ビームの吸収等に対してあるしきい値を持ち、それ以上になると急激に加工性が向上する。カーボンブラック塗布の場合には、ここで示した計算結果より送り速度等、加工能率は2倍以上に向上する。したがって、計算結果で示された二つの熱源の体積能率は、現在行っている実用上の最適条件と若干異なる場合があるが、両熱源の相対比較のための値としてここに示したことを付記する。

5. 結 論

以上、レーザによる金属の表面硬化における熱源の影響として、今回はガウス型分布熱源とドーナツ型分布熱源の二つを取り上げた。その結果、次のような結論を得た。

- (1) ガウス型分布熱源を用いた場合、変態して硬化する面積は、出力2kWでの本実験の最適条件でみると、焦点外しされ、拡大された熱源の e^{-2} となる熱源幅より小さい範囲、すなわち熱源面積の60~80%程度が硬化層となる(図7)。また、ドーナツ型分布熱源におけるその値は、熱源となる範囲の100%あるいはそれ以上が硬化層に変換されることがわかった(図11)。
- (2) 適当に条件を選べばドーナツ型分布熱源の時は、その輪状の前方の熱源で材料は予熱を加えられ、材料が変態点以上に昇温した後、一旦、変態点温度ぎりぎりまで冷却され、再び後方の熱源によって溶融温度近くまで昇温されるため、 A_1 変態点以上に滞留する時間が倍増され、焼入れ面積が大きくなる。
- (3) 材料表面が溶融せずに焼入れできるそれぞれの最

適な条件でガウス型分布熱源とドーナツ型分布熱源を比較した場合、ドーナツ型分布熱源の方が硬化深さは約3割増、硬化幅は約4割増となり、硬化面積としては約2倍強と向上した。

レーザ光を金属表面に照射し、その熱エネルギーを利用して表面を硬化させる方法は既に多くの実験がなされているが、効率よい焼入れをするためには最適な熱源を用いることが重要である。また、一方において、金属表面のコーティングの種類と方法、または焼入れ性の向上につながる成分元素の添加、金属材料の前処理等の検討が必要で、更にその方面の研究をも含めた総合的研究が望まれる。

文 献

- 1) J.E. Miller & J.A. Wineman: Laser Hardening at Saginaw Steering Gear, Metal Progress, (May 1977).
- 2) UTRC/LASER システム資料。
- 3) 日本物理学会編: 量子エレクトロニクス, 朝倉書店(1965)。
- 4) 川澄博通, 新井武二: レーザを用いた表面硬化における熱源の影響(第1報), 精密機械, 47, 6 (1981) 669.
- 5) H. S. Carslaw & J. C. Jaeger: Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford Univ. Press, (1959).
- 6) A. E. Siegman: An Introduction to Laser & Maser, McGraw-Hill, New York, N. Y., (1971).
- 7) 川澄博通, 新井武二: レーザスポット径と焦点近傍におけるエネルギー分布, 昭和54年度精機学会秋季大会学術講演会講演論文集(1979) 259.
- 8) 川澄博通, 新井武二: 昭和54年度精機学会秋季大会シンポジウム資料(1979) 1.
- 9) 川澄博通, 新井武二: レーザによる熱処理, 電気学会電子装置・レーザ工学合同研究会資料(1979-11) 39.

精密工学系大学院(含学部)の研究テーマの調査結果

頭書のMは修士課程を、Bは学士課程を、テーマのあとの括弧中の人名は指導教官名を示す。

岐阜大学

- B ドリルのふれまわりについて
- B 穴あけ加工におけるびびり振動
- B 超硬工具の断熱コーティングについて
- B 変速機構の試作
- B 平面創成機的设计・試作(藤井 洋)
- M 一様流中で正弦振動する円柱まわりの流れ
- B 突然出発する円柱背後のうず領域の速度場について(永田 拓)

- M NC工作機械のテーブルの自動創成
- M パターン認識による電気自動車の制御(大川善邦)
- M 旋削バイトのびびり振動
- B 旋削バイトのびびり振動
- B ステックスリップ振動の発生限界
- B 旋削バイト振動系の減衰能発生機構(丸井悦男)
- M 油圧管路系の過渡現象(武藤高義)
- B 非比例負荷下の金属薄板の変形限界ひずみ線図(理論及び実験)
- B 張出し・深絞りの成形限界の数値解析と実験(理論及び実験)
- B 集合組織とヤング率の関係(理論)
- B 角筒成形における速度効果(実験)
- B 単純引張り下の不安定と板厚の関連及び繰返し折畳み単軸圧縮法による変形限界探索(実験)(後藤 学)