高出力炭酸ガスレーザービーム整形のための 銅曲面上マルチレベルCGH*

萩野秀樹** 朴 忠植** 蛭原哲弘*** 赤松宏明*** 菊田久雄*** 岩田耕一†

Multilevel Computer Generated Hologram on a Curved Surface Made of Copper for High Power CO₂ Laser Beam Shaping

Hideki HAGINO, Choong Sik Park, Tetsuhiro EBIHARA, Hiroaki AKAMATSU, Hisao KIKUTA and Koichi IWATA

A multilevel computer generated hologram (CGH) was made on a parabolic copper mirror for laser beam shaping. The CGH consisting of eight height-levels with 0.94μm in step height has been fabricated with a laser-beam direct writing lithography and the mask-electroplating method. The CGH was designed for laser surface modification with a high-power CO₂ laser. The Gaussian distribution of an incident laser beam was shaped into a Rectangle-Gaussian distribution on a focus plane of the parabolic mirror. The diffraction efficiency was 68%. When the shaped laser beam of a 1.5kW CO₂ laser irradiated a steel surface, a uniform melting layer was obtained.

Key words: computer generated hologram, beam shaping, high power laser, curved surface, laser processing

1. 緒 言

レーザーを用いた加工方法は、切断やマーキングだけでなく、溶接や表面処理、微細穴あけなど多くの分野で利用されている。それらの加工では、多くの場合、発振器によって決まるレーザー光強度分布で加工を行っているが、その強度分布は必ずしも加工目的に適切な分布ではない。レーザー光強度分布を加工目的に応じた適切な強度分布に整形することができれば、レーザー加工の品質や効率を向上させることができる。

レーザー光の強度分布を整形する方法には様々な方法があるが、光の回折現象を利用する計算機ホログラム (Computer Generated Hologram, 以下 CGH) を用いる方法は、CGH をレンズや鏡などの光学素子と同様に取り扱うことができ、整形可能な強度分布の自由度が高いという利点もあり、有効な方法である。しかし、CGH を加工用の高出力レーザーに適用するにはいくつかの問題がある。CGH は表面に微細で複雑な形状を有していることから、微細加工技術が確立しているシリコンや、炭酸ガスレーザーの波長(10.6μm)に対して高い透過率を持つセレン化亜鉛 (ZnSe) を素材として試作されている¹⁾²⁾が、耐熱性や製作の容易さにおいて課題を有している。

我々は、これまで高出力レーザー用光学素子の素材として一般的な銅を用いて、高出力炭酸ガスレーザー用の反射型 CGH を試作した³⁾⁴⁾。銅は炭酸ガスレーザー光に対する反射率が高いという利点だけでなく、熱伝導性にも優れているため、レーザー加工に CGH を適用する場合に素子の冷却が容易になる。また、炭酸ガスレーザーだけでなく、YAG レーザなど他のレーザー用 CGH の素材としても利用できる。これまでに試作した CGH は、レーザー集光用の放物面鏡を基板として 2 レベルのバイナリー形状をもつもの、および、平面基板上に複数の段差を持つマルチレベル形状をもつものであった。基板を放物面鏡にした CGH では一つの素子で

集光とビーム整形の 2 つの機能を実現できる。一方、平面型のマルチレベル形状の CGH では、集光用のレンズを必要とするが、より目標のものに近い光強度分布が得られる利点があった。

本研究では、集光機能と良好なビーム整形機能を持つ CGH を実現するために、放物面鏡上にマルチレベルの形状を持つ CGH を試作した。平面基板の CGH に集光機能を併せもつ CGH の設計も可能であるが、この場合には CGH 表面に、より微細な凹凸形状を設ける必要があり、実際の製作は容易ではない。基板を放物面鏡にすることにより、凹凸形状の基本サイズを大きくとることができ、製作が容易になる。放物面鏡上への微細パターンの描画は、レーザービーム描画を用いて行った。ここでは CGH の製作方法について述べるとともに、試作された CGH の光学評価の結果を示す。また、実際に CGH によって整形されたレーザービームを鉄鋼材料に照射して鋼材表面の熔融特性を調べたので、その結果についても述べる。

2. CGH の設計

CGH を用いたビーム整形の基本構成を図 1 に示す。光源は波長 10.6μm の炭酸ガスレーザーで、出力されるレーザー光の強度分布を直径φ14mm (ピーク強度の 1/e² の径) のガウス分布とする。レーザー光は CGH に対し 45° の角度で入射し、入射方向に対し 90° 方向に折り返される。CGH の基板は焦点距離 127mm の銅の放物面鏡とし、放物面鏡の焦点位置で、定められたビーム形状になる。

Fig.1 Basic configuration of beam shaping system using multilevel CGH on a curved surface

* 原稿受付 平成 17 年 10 月 19 日

** 正 会 員 大阪府立産業技術総合研究所 (大阪府和泉市あゆみ野 2-7-1)

*** 大阪府立大学 大学院 工学研究科 (大阪府堺市学園町 1-1)

† 大阪府立産業技術総合研究所 (大阪府和泉市あゆみ野 2-7-1)

CGH 表面の模式図を図 2 に示す。CGH は放物面鏡表面に微細な凹凸形状を有しており、図 2 では、放物面からの凹凸形状の高さを白黒の濃淡で表している。凹凸形状は、一辺が $80\mu\text{m}$ の正方形のピクセルを最小単位として、 256×256 個のピクセルで構成されており、全体では一辺が 20.48mm ($=256 \times 80\mu\text{m}$) の正方形である。凹凸形状は 8 レベルであり、最小段差は $0.94\mu\text{m}$ 、基板表面からの最大高さは $6.56\mu\text{m}$ である。

目標とする整形ビームの形状は、焼入れ等のレーザー表面処理に適用することを想定して、図 3 に示す矩形ガウス分布とした。これは x 軸方向には幅 4mm で一様な分布、 y 軸方向にはピーク強度の $1/e^2$ の幅が 1mm のガウス分布となっている。

CGH の凹凸形状の設計は、フーリエ変換に基づいた反復計算手法の一つである GS 法³⁾で行った。設計モデルは、基板となる放物面鏡の焦点距離が長く、表面形状は平面に近いので、入射光に対し 45° 傾いた平面ホログラムとレンズを組み合わせたモデルとした³⁾。ただし、ホログラムとレンズ中心間の距離を 0 とすることで曲面上 CGH のモデルと等価とみなした。また、GS 法で得られるのは 0 から 2π の間の連続した位相分布であるため、これを一定の間隔で 8 段階に量子化し、得られた位相分布に対応した高さを放物面鏡の形状に足しあわせて CGH の形状を設計した。足し合わせた方向は放物面鏡中心の法線方向とした。

3. CGH の製作と評価

3.1 マスクめっき法の最適化

マルチレベル CGH の作製ではフォトリソグラフィーとめっき技術を組み合わせたマスクめっき法⁴⁾を用いる。マスクめっき法では、銅基板上にフォトレジストを塗布し、CGH のパターンを露光・現像した後、銅めっきを行う。フォトレジストに覆われていない基板上に銅が堆積するので、露光パターンを変えながら工程を繰り返すことで、階段状の断面をもつマルチレベルの表面凹凸形状が形成される。ここでは CGH の基板表面が曲面形状をしているため、レジストへのパターンの露光は 3 軸ステージを持つレーザー描画装置³⁾を用いて行った。

CGH を作製する場合に重要なのは、めっき表面の粗さとめっき厚さの精度である。マスクめっき法では、めっき層を積み重ねるほど表面が粗くなる傾向があり、回折効率の低下や整形したビームの強度分布が乱れる要因になっている。また、めっき厚さの誤差は 0 次光強度の増加の要因となり、結果的に整形ビームの強度分布が乱れる要因となっている。また、基板表面が曲面であることから、めっき厚さの均一性が低下することも予想される。そこで、めっき時の CGH 固定治具の工夫とめっき条件の最適化を行うことで、めっき精度の向上をはかった。

めっき装置の模式図を図 4 に示す。めっき浴は、室温でめっきを行うことができ、廃水処理が容易な硫酸銅めっき浴とした。めっき浴の組成は均一電着性に優れ、精密な厚さ制御に向いているプリント基板用のものとした。CGH の固定治具の写真および模式図を図 5 に示す。治具と CGH に位置決め用の面（当たり面）を設け、CGH 表面と治具表面に段差のない構造にしている。また、CGH を裏面からネジで治具に押しつけ、当たり面での治具との接触を確実にすることで、導通を確かなものとしている。

めっきのパラメータには、電流密度、めっき浴温度、めっき液の攪拌の有無とその方法がある。種々の実験を行い、これらのパラメータを最適化した。最終的に設定したパラメータは電流密度 100A/m^2 、めっき浴温度 $19 \sim 20^\circ\text{C}$ とし、めっき時にはエアバブルにより、めっき液の攪拌を行った。設定したパラメータでのめ

Fig.2 Structure model of the CGH

Fig.3 Desired intensity distribution

Fig.4 Apparatus for acid copper plating

Fig.5 Cathode holder with CGH

き速度は約 $0.2\mu\text{m}/\text{min}$ であった。ただし、めっき速度はめっき浴の状態（濃度や組成の比率など）やめっきを施す面積などで異なるため、実際の CGH 製作時には、めっきを行うパターンで、めっき速度をあらかじめ測定することで、めっき時間を決定した。また、基板の保持方向によってめっき厚さが不均一になる現象が見られたので、所定のめっき時間の半分が経過した時点で、保持方向を 180° 回転させて再びめっきを行うことにより、不均一を解消した。

3.2 CGH の製作

CGH の基板素材には無酸素銅を用いた。CNC 超精密加工機（豊田工機 AHN60-3D）を用いて、単結晶ダイヤモンドバイトでの超精密切削加工により銅表面を放物面鏡の形状に加工した後、ワイヤカットを用いて、厚さ約 4mm の放物面鏡基板を切り出した。放物面鏡の最大深さは 0.77mm である。

次に、基板にポジ型レジスト（クラリアントジャパン AZ1500）を約 $4\mu\text{m}$ の厚さに塗布し、レーザ描画装置（ネオアーク DDB-3TH）を用いて CGH パターンの描画を行った。現像後のめっき工程は 3.1 節で述べたとおりである。8 レベルの CGH を作製するためには、描画とめっきの工程を 3 回行うが、それぞれめっき厚さとパターンが異なるために、めっき時間が変わる。1 回目のめっき時間は 18 分 18 秒（めっき厚さの設計値 $3.75\mu\text{m}$ ）、2 回目は 9 分 41 秒（めっき厚さ $1.88\mu\text{m}$ ）、3 回目は 5 分 8 秒（めっき厚さ $0.94\mu\text{m}$ ）であった。

以上の方法で銅の放物面鏡上に 8 レベルの CGH を製作した後、表面の腐食防止とレーザ光の反射率向上のために、表面に金薄膜を約 50nm の厚さでスパッタコーティングした。

3.3 CGH の形状評価

製作した CGH を図 6 に示す。中央の縞状模様の部分に CGH の凹凸パターンが形成されている。CGH の作製では 3 回のめっき工程を行うが、それぞれのめっき終了時に 3 次元構造解析顕微鏡（Zygo New View 5020）を用いて、めっき厚さを測定した。測定点は、CGH パターン全体から均等に 4×4 点選んだ。めっき厚さの測定結果を表 1 に示す。測定結果から、めっき厚さのばらつきの標準偏差は $0.03\sim 0.06\mu\text{m}$ であった。数値シミュレーションでは、めっき厚さのばらつきは 0 次光強度と回折効率に影響し、めっき厚さのばらつきが $0.1\mu\text{m}$ の場合、0 次光強度は設計値の約 1.1 倍、効率の低下は約 1.5% にしかならないことが分かっている。

また、CGH の各段での表面粗さも測定した。CGH の中央付近において、評価長さを $0.5\sim 1\text{mm}$ 程度確保できる箇所を選択し、各高さレベルごとに 4 カ所ずつ測定した。測定結果の平均値を表 2 に示す。めっきを行っていない切削加工面は 38nmRa であるが、めっきを行った面は $100\sim 160\text{nmRa}$ 程度であった。従来の結果⁴⁾と比較すると、1 回目のめっき後の表面粗さは低下しているが、2 回目、3 回目のめっき時の表面粗さは改善している。また、従来は、めっきを繰り返すにつれて表面粗さが大きくなっていったが、ここではその傾向は見られない。これらは治具の改良などを含めためっき手法の改善の効果だと考えられるが、詳細なメカニズムの理解については、今後の検討課題である。

3.4 小型炭酸ガスレーザーを用いたビーム整形実験

最大出力 10W の炭酸ガスレーザー（SYNRAD 48-1W）を用いて、製作した曲面マルチレベル CGH のビーム整形結果の強度分布を測定した。レーザ発振器から出力されたレーザ光はビーム径 $\phi 3.5\text{mm}$ 、ガウス分布（TEM₀₀ モード）をしたレーザ光である。これを減光した後、ビームエキスパンダにより、 $\phi 14\text{mm}$ に広げて CGH に入射させる。CGH により整形されたビームを CGH の基板

Fig.6 Fabricated multilevel CGH

Table 1 Plating thickness of the CGH [μm]

	Plating times		
	1st.	2nd.	3rd.
Mean	3.81	1.80	0.91
Maximum	3.88	1.90	0.99
Minimum	3.71	1.70	0.88
Standard deviation	0.045	0.057	0.030
Designed thickness	3.75	1.88	0.94

Table 2 Surface roughness of the CGH

Level (Plating times)	Roughness Ra [nm]
0 (0)	38
1 (1)	151
2 (1)	124
3 (2)	146
4 (1)	91
5 (2)	148
6 (2)	149
7 (3)	157

Fig.7 Shaping beam image for a low power laser

である放物面鏡の焦点位置に設置した赤外線カメラ（三菱電機 IR-U300M）で観察した。整形されたビームの観察画像を図 7 に示す。 $1\text{mm} \times 4\text{mm}$ の設計値とほぼ同じ大きさの強度分布が得られており、ビーム整形を実現している。強度むらも見られるが、表面処理を行う場合には、熱伝導による加工であるため、あまり問題にならないと思われる。

回折効率を「CGH に入射するレーザ光強度に対する整形ビーム（ $1\text{mm} \times 4\text{mm}$ ）内の強度（0 次光強度をのぞく）の割合」と定義して、その値を調べたところ 67.8% であった。具体的には以下の手順で回折効率を求めた。はじめに、CGH からの回折光の集光位置に回折像と同じ形をもつ矩形開口（ $1\text{mm} \times 4\text{mm}$ ）の遮蔽板を設

置し、この開口を通過する光強度の割合を測定した。つぎに、パターン中央に現れている回折されなかった光による強い 0 次光があるので、この成分を図 7 の赤外線画像データから求め、先の割合から差し引いた。ここでは、矩形開口を通過する光強度の割合が 70.3%、さらにその中に含まれる 0 次光強度の割合が 3.5%であったので、回折効率として 67.8%の値を得た。著者らは平面マルチレベル CGH の場合において 69.2%の回折効率を得ており⁴⁾、今回の曲面についてもほぼ等しい値が得られたことになる。

4. 鉄鋼材料の溶融に及ぼすビーム整形の効果

4.1 実験装置

製作した曲面マルチレベル CGH を高出力炭酸ガスレーザー加工機（川崎重工業 AF-5L）に搭載し、整形したビームを鉄鋼材料に照射して走査し、その溶融特性について調べた。用いたレーザー加工機の最大出力は 5kW、ビーム径は $\phi 14\text{mm}$ である。また、ビームの強度分布はガウス分布が乱れたものになっており、ニアシングルモードに近い分布をもつ。

CGH の保持具は、CGH を効率よく冷却させるために素材をアルミ合金とし、内部に冷却水を循環させている。CGH を含めた光学系の調整は、炭酸ガスレーザー加工機に組み込まれている He-Ne レーザ（炭酸ガスレーザー光と同一光路）を用いて行った。実験に使用した供試材は合金工具鋼 SKD11 で、表面をフライス加工により平滑にし、レーザー光吸収の均一性を高めるためにブラスト処理を施した後、アセトンにより脱脂した。

4.2 CGH 適用のための予備実験

はじめに CGH の高出力レーザー光に対する耐久性を調べるために、CGH をレーザー加工機に搭載し、出力 2kW のレーザー光を 10 秒間照射した。照射前と照射後の表面形状を 3 次元構造解析顕微鏡を用いて比較した結果、表面形状の変化は見られなかった。

次に、高出力レーザー用強度分布測定装置（Prometec Laser Scope UFF100）を用いて、整形したビームの強度分布を測定した。強度分布の測定結果を図 8 に示す。図 8 (a)は二次元強度分布、図 8 (b), (c)は、図 8 (a)内の点線位置における強度分布であり、それぞれ均一な強度分布の方向とガウス分布方向である。レーザー光強度分布の形状は、3.4 節で得られたように不均一であり、大きさも設計した分布より大きくなっているが、矩形形状にビーム整形されている。図 7 での強度分布がほぼ設計通りの大きさになっていることから、高出力レーザー光での強度分布のずれは CGH への入射光強度分布がガウス分布とは異なっていることや光学系のセッティングずれなどが原因だと考えられる。

4.3 溶融形状の比較

CGH により整形したビームを照射しながら試料を移動させ、試料の溶融状態を調べた。試料の移動方向は整形ビームの均一強度（幅 4mm）の方向に対して垂直方向とし、加工面上でのレーザーパワーが 1.0~1.5kW、移動速度が 2.5~10.0mm/s の条件で実験を行った。また、比較のためにレンズにより集光したビームを用いて同様の実験を行った。レンズの焦点距離は CGH 基板の放物面鏡と同じ（127mm）ものを用い、ビーム照射幅を整形ビームと同じにするために、試料を焦点位置からディフォーカスすることでビーム径を $\phi 4\text{mm}$ にした。

図 9 にレーザーパワー 1.5kW、移動速度 5mm/s でのレーザー光照射部の断面マクロ写真を示す。図 9 (a)は CGH を用いて整形したビームを照射した結果、図 9 (b)はレンズにより集光したビームを照射した結果である。図の白い部分が溶融した領域である。CGH で整形したビームの場合はガウス分布の場合と比べ、溶融幅には

Fig.8 A beam profile shaped by the CGH for a high power laser; (a) 2D intensity distribution, (b) cross sectional intensity for flat top direction, (c) gaussian direction

(a) shaped beam
melt zone depth : 0.45mm

(b) beam through a lens system
melt zone depth : 0.74mm

Fig.9 Cross sectional macrographs of laser irradiated steel (SKD11)
Laser power : 1.5kW, Traveling speed : 5mm/s

Fig.10 Relationship between laser irradiate parameter and melt zone size

あまり差がないが、溶融深さは浅くなっており、幅広く浅い溶融部が得られることがわかる。この溶融形状は、整形したビームを用いた場合、各位置において照射されたエネルギー密度がほぼ均一なことを、よく反映していると考えることができる。

図 10 に、整形ビーム（1mm×4mm の矩形ガウス分布、レーザーパワー 1.5kW、1.0kW、図中では CGH と表記）とレンズを用い、ディフォーカスさせたガウス分布のビーム（ $\phi 4\text{mm}$ 、レーザーパワー 1.5kW、図中では Lens と表記）を照射した場合の試料の移動速度と溶融幅、溶融深さの関係を示す。溶融幅は整形ビームの場合、移動速度が小さい条件で、4.2mm 程度である。これは整形ビームの幅が 4mm よりやや大きいことを反映していると考えられる。この幅はレーザーパワー 1.5kW に対しては 7.5mm/s、

1.0kW に対しては 5mm/s の速度までほぼ一定であり、これらの速度以上で照射すると、溶融幅は急激に小さくなる傾向を示した。今回実験した範囲内では、レーザパワーが変わってもこれらの特徴は変わらなかった。二つの照射強度において、それぞれ溶融幅が急激に変わる限界速度での単位時間あたりの照射エネルギー量（レーザパワー／移動速度）は、ほぼ等しい値をとる。したがって、CGH によって整形されたビームでは、単位時間あたりに、あるエネルギー量以上を照射することで、入射ビーム幅とほぼ等しい溶融幅を得ることができる。一方、ガウス分布の場合、溶融幅は移動速度の上昇に比例して小さくなる傾向が見られており、整形ビームとは異なる傾向を示した。また、ある速度以上では溶融幅の減少の傾きが小さくなっており、この原因に関しては、今後検討を行う必要がある。

溶融深さについては、整形ビームの場合、溶融幅のような閾値は存在せず、移動速度に比例して単調に浅くなる傾向が見られた。この実験結果から、単位時間あたりの照射エネルギー量は溶融深さと単純な比例関係にはなっていないが、適当な移動速度を与えることで、溶融深さを制御することができる。一方、ガウス分布のビームを用いた場合においても、走査速度に比例して単調に浅くなる傾向が見られた。

以上の実験結果から、整形したビームを用いると、ある速度以下で試料を移動させることでビーム幅に等しい溶融幅を安定して得ることが可能であり、移動速度によって溶融深さを制御することができる。一方、レンズ光学系を用いて通常のガウス分布で照射すると、走査速度の変化とともに溶融幅と深さがいずれも変化するので、所望する溶融形状を得ることは容易でない。CGH によるビーム整形を熱解析と組み合わせることにより、より複雑な溶融形状や熱処理加工を行うことが可能である。

5. 結 言

本研究では、銅の放物面上に多段の凹凸構造を作製すること

で、集光機能とビーム整形機能を合わせもつ高出力レーザ用の CGH を試作した。また、CGH を高出力炭酸ガスレーザ加工機に搭載してビーム整形を行い、実際に鉄鋼材料に照射することで CGH によるビーム整形の効果を確かめた。

CGH の試作では、3 軸ステージをもつレーザビーム描画とマスクめっき法を用いた。低出力の炭酸ガスレーザを用いて、作製した CGH のビーム整形実験を行った結果、ほぼ設計値通りの大きさにビームを整形することができ、回折効率率は約 68% であった。また、CGH を高出力炭酸ガスレーザ加工機に搭載しても、CGH の損傷は見られず、ビームを整形することができた。

整形したビームを用いて鉄鋼材料の表面溶融特性を調べたところ、通常のガウス型強度分布を用いた場合とは異なる溶融特性を示し、ビーム整形によって溶融幅と溶融深さを容易に制御できることがわかった。

CGH によるビーム整形の自由度は高い。今回の報告では、一方向に一樣な強度分布を発生させる CGH を作製したが、パターン内に適当な強度分布をつけることもできる。この技術を用いれば、溶融幅だけでなく、溶融深さをより均一にすることも可能であり、レーザ加工の品質や効率の向上が期待できる。

参 考 文 献

- 1) Ch.Haupt, M.Pahlke, R.Krupka and H.J.Tiziani : Computer-generated microcooled reflection holograms in silicon for material processing with a CO₂ laser, *Appl. Opt.* **36**, (1997) 4411.
- 2) 布施敬司, 江畑恵司, 白川 二, 塩崎 学, 服部哲也, 赤坂伸宏, 瀬村 滋 : ZnSe 回折型光学部品の開発, *SEI テクニカルレビュー*, **153**, (1998) 119.
- 3) 萩野秀樹, 朴 忠植, 加藤暢宏, 三俣真理, 菊田久雄, 岩田耕一 : 炭酸ガスレーザビーム整形のための曲面上 CGH の製作, *精密工学会誌*, **69**, (2003) 417.
- 4) 萩野秀樹, 朴 忠植, 横井昌幸, 加藤暢宏, 三俣真理, 菊田久雄, 岩田耕一 : 高出力レーザビーム整形のためのマルチレベル銅 CGH の製作, *精密工学会誌*, **70**, (2004) 1180.
- 5) R.W.Gerchberg and W.O.Saxton : A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures, *Optik*, **35**, (1972) 237.