

高出力レーザービーム整形のための曲面上CGHの開発

Computer Generated Hologram on Curved Surface for High Power CO₂ Laser Beam Shaping

萩野 秀樹* 朴 忠植** 加藤 暢宏***
Hideki Hagino Choong Sik Park Nobuhiro Kato

三俣 真理**** 菊田 久雄**** 岩田 耕一****
Mari Mitsumata Hisao Kikuta Koichi Iwata

(2004年7月5日 受理)

This paper describes a computer generated hologram (CGH) on a curved surface for laser processing. The CGH fabricated on a parabolic copper mirror converts a 14-mm diameter Gaussian beam of a CO₂ laser into a shaped beam whose intensity distribution is uniform (4 mm) in the x-direction and Gaussian (1 mm) in the y-direction. A laser direct writing machine drew the binary CGH pattern with a focus servo mechanism. A palladium thin film was placed between the copper mirror and a 3.75- μ m-thick plated copper layer to obtain an accurate step height of CGH pattern. The plated layer was etched by a ferric chloride solution. The palladium film prevented the substrate mirror from being etched. Beam shaping by the fabricated CGH was demonstrated experimentally with a low power CO₂ laser and an infrared-camera.

キーワード：レーザー加工，ビーム整形，計算機ホログラム，CGH，光学素子，銅，レーザー描画，炭酸ガスレーザー，エッチング，めっき

1. はじめに

レーザー加工は、切断、溶接、表面改質をはじめとする様々な加工分野に利用されている。レーザー加工ではビームの強度分布が加工品質に影響するため、加工目的に応じた適切な強度分布が求められる。特にレーザー表面改質の場合、ビームのエネルギー分布が改質層の形状に大きく影響するため¹⁾、ビーム整形の必要性が高い。

ビーム整形の方法ではマスクを用いる方法が最も容易であるが、高出力レーザー加工に適用する場合には、

マスクの損傷やマスクにより遮られたレーザー光の処理の問題、また、光の利用効率の低下による加工効率の低下などが問題となる。その他にはビームを走査することで実効的なビーム形状を作り出す方法やシリンドリカルレンズ等を複数用いる方法がある²⁾。しかし、これらの方法は、複雑な機構と高価な部品を必要とするほか、ビーム整形の自由度が低いなどの問題がある。

一方、レーザー計測などの分野でビーム整形に用いられている手法の一つに微細で複雑な表面形状を持つ計算機ホログラム (CGH: Computer Generated Hologram) を用いる方法がある。これはCGH表面の形状や屈折率の分布による光の回折現象を利用した素子であり、複雑なレーザー光強度分布を作り出すことができる。この方法を用いることにより、装置が単純になるだけでなく、原理的にも複雑なビーム形状を作り出せるので、高度なレーザー加工にも対応できる。この

* 機械金属部 加工成形系
 ** 情報電子部 制御情報系
 *** 近畿大学 生物理工学部
 **** 大阪府立大学 工学研究科

CGHを高出力レーザー加工に適用する試みが近年行われている³⁻⁶⁾。

高出力レーザーに対応した素子の作製には幾つかの課題がある。これまでに試作された高出力レーザー用のCGHは、平面基板上に作られたものであり、集光レンズと組み合わせて使用する必要があった。これに対し、曲面上にCGHのパターンを作製することができれば、レンズを用いることなく、高精度なビーム整形を行うことができる。しかし、曲面上に微細なCGHパターンを作製するには工夫を要する。また、従来の高出力レーザー用CGHの材料はシリコンやセレン化亜鉛(ZnSe)であり、これらの材料は熱伝達特性に劣ることから、高出力レーザーに適用するには複雑な冷却機構を備える必要があった。しかし、CGHを銅などの熱伝達特性の優れた材料で作製すれば、冷却機構を簡易にすることができる。

本研究では、レーザー光集光用の銅の放物面鏡上にCGHパターンを形成した素子(以下、曲面上CGH)の開発を目的としている。ここでは、曲面上CGHをレーザー表面改質に適用することを想定し、素子の設計と製作の方法について検討を行い、実際に素子を作製し、炭酸ガスレーザーを用いてビーム整形機能を確認する実験を行った結果を示す。

2. 曲面上CGHの設計

曲面上CGHを用いたビーム整形の模式図を図1に示す。曲面上CGHに入射するレーザー光は、波長 $10.6\mu\text{m}$ の炭酸ガスレーザー光とし、強度分布はビーム径 14mm のガウス分布^{*1)}とする。曲面上CGHの基板は焦点距離 127mm の放物面鏡とし、図1に示すように入射光に対し 90° の方向に光を折り返して加工する。

目的とする加工面上の強度分布は、図2に示すような x_2 軸方向に幅 4mm で一様、 y_2 軸方向に幅 1mm のガウス分布とする。レーザー表面改質を行う場合はビームを y_2 方向に走査する。

曲面上CGHのパターンは、1辺が d の長さをもつ微小正方形を単位ピクセルとして、図3に示すような $N \times N$ 個の集まりで構成する。従って、曲面上CGHのパターンは一辺が $D = N \times d$ の長さを持つ正方形である。ビームが放物面鏡に 45° の角度で入射するために、 $\phi 14\text{mm}$ の入射ビームは曲面上CGHのパタ

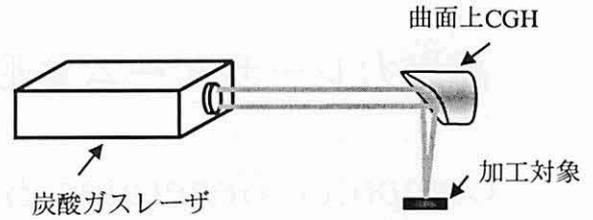


図1 曲面上CGHを用いたビーム整形の模式図
Basic configuration of beam shaping system with the curved surface CGH

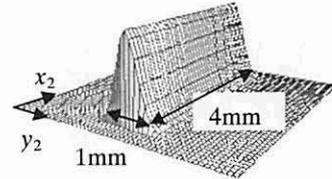


図2 ビーム整形の目標とするレーザー光強度分布
Desirable energy distribution of shaped beam

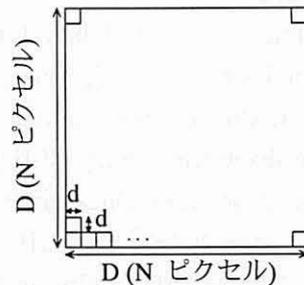


図3 曲面上CGHパターン形状模式図
Structure model of curved surface CGH pattern

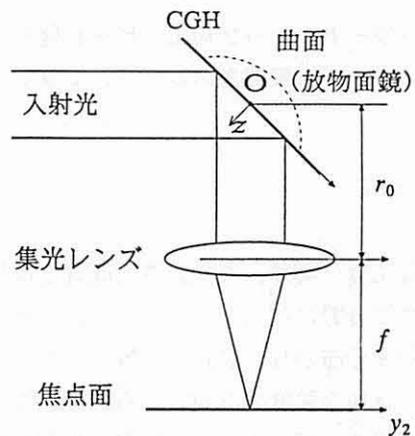


図4 曲面上CGHパターン計算モデル
Calculation model of curved surface CGH pattern

ーン上では長径 19.8mm 、短径 14mm の楕円形となる。よって曲面CGHパターンの一辺の長さ D を 20.48mm とした。

曲面上CGHパターン設計のためのモデルを図4に示す⁶⁾。基板となる放物面鏡は焦点距離が長く、表面

*1) ガウス分布の裾野は、半径方向に無限遠まで伸びているので、一般にビーム径は最大強度の $1/e^2$ となる強度の径で代表させる。ただし、 e は自然対数の底である。

形状は平面に近いので、ここでは入射光に対し、 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を用いてパターン設計を行った。ただし、ホログラムとレンズ中心間の距離 r_0 を 0 とすることにより、本モデルを曲面上 CGH のモデルと等価とみなした。最後に、得られたホログラムパターンを z 方向に曲面に投影して、曲面上 CGH のパターンとする。

実際に設計した曲面上 CGH パターンの凹凸高さ分布 $h(x_1, y_1)$ を図 5 に示す。ここで、 $h(x_1, y_1)$ はアナログ値になっており、高さ分布を白黒の濃淡で表している。白い領域が最も高く $7.5\mu\text{m}$ である。高さ $h(x_1, y_1)$ の位置で反射した光と高さ $0\mu\text{m}$ の位置で反射した光との間に生じる位相差を $\theta(x_1, y_1)$ 、レーザー光の波長を λ 、レーザー光の CGH への入射角を α とすると

$$\theta(x_1, y_1) = 2\pi \cdot 2h(x_1, y_1) \cos\alpha / \lambda \quad (1)$$

なので、 $h(x_1, y_1)$ が $7.5\mu\text{m} (= \lambda / 2 \cos\alpha)$ の位置で反射した光と高さ $0\mu\text{m}$ の位置で反射した光との間には、 2π の位相差が生じる。

実際にホログラムを製作する場合、連続的な高さ変化を持つ素子を製作するのは容易でない。そのため、曲面上 CGH の形状は、一定の高さごとに区切って、数段のレベルに量子化される。図 5 の曲面上 CGH パターンを 2 レベルにし、その CGH を用いて整形した場合の強度分布のシミュレーション結果を図 6 に示す。この場合、高さ $h(x_1, y_1)$ は $0\mu\text{m} (\theta(x_1, y_1) \leq \pi/2)$ 、 $3\pi/2 < \theta(x_1, y_1) \leq 3\pi/2$ の 2 段階になる。レベル分けを粗くするにつれて誤差が大きくなり、回折像も乱れるが、熱伝導によって処理するようなレーザー表面処理の場合、2 レベルでの回折像でも十分に加工品質を向上させる効果はある。従って、本研究では 2 レベルの素子を作製することとした。

3. 曲面上 CGH の製作

(1) 曲面上 CGH の構造

曲面上 CGH の断面構造を図 7 に示す。基板はレーザー光を集光するための銅の放物面鏡とし、その上にパラジウムの薄膜層、曲面上 CGH のパターンニングが施された銅めっき層、および金コーティング層で構成されている。金コーティング層はレーザー光の反射率を向上させる役割を持つ。パラジウムの薄膜層は銅をエッチングする際のエッチングストップ層である。通常、金属を腐食液でエッチングする場合、金属の結晶粒よりも粒界の方が腐食されやすいため、エッチング後の表面に結晶粒の凹凸が現れ、鏡面を保つことができ

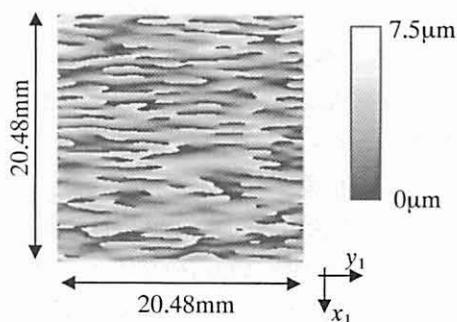


図 5 CGH パターンの設計値

Calculated continuous CGH pattern $h(x_1, y_1)$, 256×256 pixels ($d = 80\mu\text{m}$)

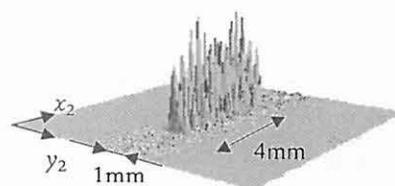


図 6 設計した 2 レベル CGH を用いて整形したレーザー光強度分布のシミュレーション結果

Computer simulated intensity distribution of shaped beam for 2 level ; 256×256 pixels

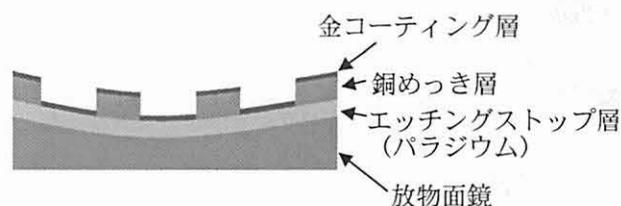


図 7 曲面上 CGH の断面構造

Cross-sectional structure configuration of curved surface CGH

ない。本研究では腐食液に FeCl_2 溶液を用いるが、 FeCl_2 溶液に耐性を持つパラジウムを下地にして銅めっき層をエッチングする方法で、銅の溶解が基板部まで進まないようにした。パラジウム薄膜の表面は基板の表面粗さをほぼ反映しており、良好な状態が保たれる。また、パラジウムには FeCl_2 溶液に耐性があるほかに銅との密着性がよいという利点もある。

(2) 曲面上 CGH 製作手順

曲面上 CGH の製作手順を図 8 に示す。はじめに $\phi 30\text{mm}$ の無酸素銅の円柱から超精密加工機を用いて厚さ約 5mm の放物面鏡を作製した。得られた放物面鏡の表面粗さは $0.008\mu\text{mRa}$ であった。この値は通常の放物面鏡で要求される表面粗さ $0.02\mu\text{mRa}$ に比べて十分小さい。

放物面基板上に真空蒸着により厚さ $0.2\mu\text{m}$ のパラジウム層を付けた後、電気めっきにより銅めっき層を $3.75\mu\text{m}$ の厚さで形成する。その上にポジ型レジストAZ1500(クラリアントジャパン製)を塗布し、曲面上CGHパターンの描画を行った。描画には、ネオアーク社製のレーザー描画装置(DDB-3TH)を用いた。光源はHe-Cdレーザー(波長 442nm)であり、描画部でのレーザー強度は約 $45\mu\text{W}$ である。描画対象が曲面であるため、高さ方向(Z軸方向)に $\pm 10\text{mm}$ の可動範囲を持つZ軸ステージとサーボ機構を追加することで、描画用対物レンズと試料の間隔を一定に保つようにした。曲面上CGHパターンの総描画時間は約48時間であった。

フォトリソを現像した後、 FeCl_2 溶液(0.85%)を使って銅めっき層をウェットエッチングし、表面に金薄膜を $0.05\mu\text{m}$ の厚さでコーティングした。

(3) 曲面上CGHの形状評価

作製した曲面上CGHを図9に示す。中央の縞状模様の部分に曲面上CGHの凹凸パターンが形成されている。また、曲面上CGHの表面形状を3次元表面構造解析顕微鏡(Zygo社, New View 5020)を用いて数点測定した結果、曲面上CGHの凹凸高さは $3.1\sim 3.9\mu\text{m}$ の間でばらついていた。高さのばらつきはめっきの不均一さが原因と考えられる。また、曲面上CGH

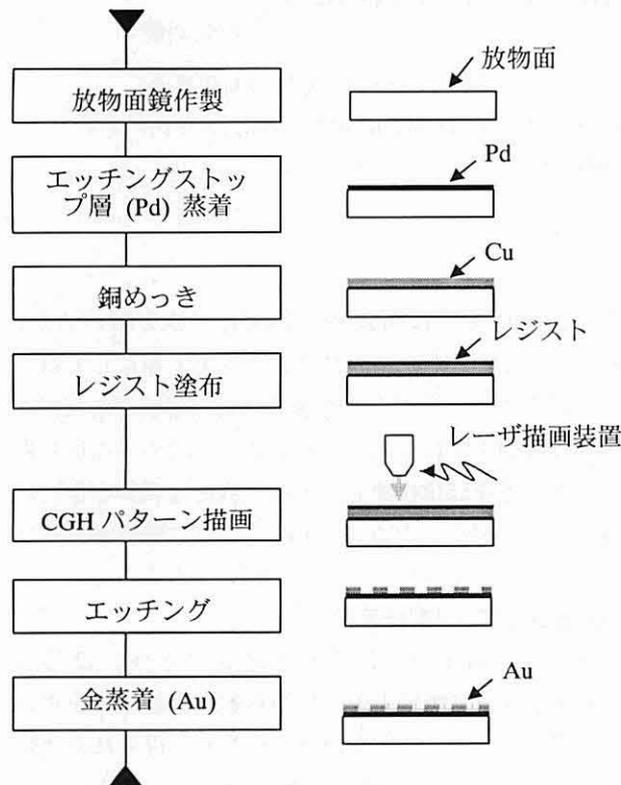


図8 曲面上CGH作製プロセス
Fabrication process of curved surface CGH

面内の形状については、凸部分の側面が平均 $10\mu\text{m}$ 程度小さくなっていた。レーザー描画装置によるレジストパターンの製作精度が $1\mu\text{m}$ 以下であるため、この曲面上CGH面内の形状の誤差は側面がエッチングされた(サイドエッチ)ためだと考えられる。

表面粗さは、エッチングされていない面では $0.04\sim 0.22\mu\text{m Ra}$ 、エッチングされた面(パラジウム面)では $0.04\mu\text{m Ra}$ であった。エッチングされていない面の表面粗さが大きくなった原因としては、めっきの不均一さが考えられる。一方、エッチングを行った面の表面粗さは銅基板の表面粗さ $0.008\mu\text{m Ra}$ より粗くなっているが、エッチングストップ層を利用しない場合の面粗さ $0.2\sim 0.5\mu\text{m Ra}$ に比べて、大幅に改善されている。今回得られた表面粗さは、放物面鏡で要求される面粗さ $0.02\mu\text{m Ra}$ と同程度のものが得られている箇所もあり、めっき条件の改善により上記の目標値を達成できると考える。

4. 曲面上CGHの評価

製作した曲面上CGHの光学的性能を評価するために回折像の観察を行った。実験系を図10に示す。光源には出力 10W の炭酸ガスレーザーを用いた。エキスパンダにより $\phi 14\text{mm}$ に広げたビームを曲面上CGH

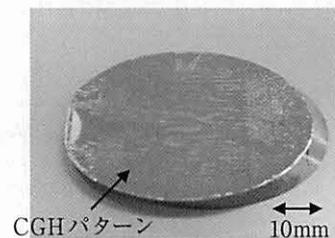


図9 作製した曲面上CGH
Fabricated curved surface CGH

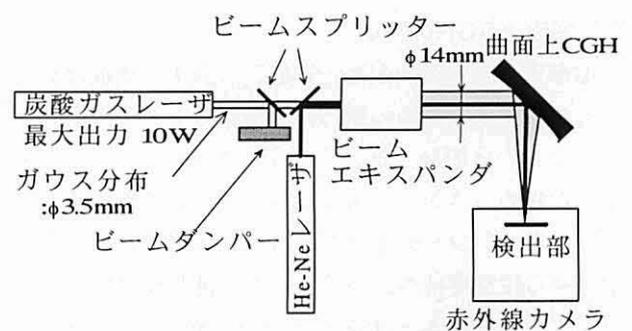


図10 曲面上CGH評価実験系
Experimental setup for evaluating curved surface CGH

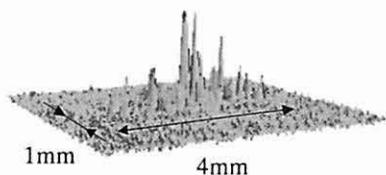


図11 整形ビームの強度分布

Intensity distribution of shaped beam from the curved surface CGH

に照射し、回折光を赤外線カメラ(三菱電機, IR-U300)で観察した. なお, カメラの耐光強度が低いため, 2枚のビームスプリッタにより約 $1/40000$ に減光している.

得られた回折像の強度分布を図11に示す. 回折像の大きさは $1\text{mm}\times 4\text{mm}$ 程度であり, ほぼ設計通りであった. また, 回折像の $1\text{mm}\times 4\text{mm}$ 内の強度和と撮画像全域の強度和の比を回折効率と定義すると, この効率は65.7%であった.

得られた強度分布が目標の分布と異なる原因を調べるために素子の製作誤差と強度分布の関係についてシミュレーションを行った. その結果, 図11に示される多数の針状のピークは, 曲面上CGHの形状が2レベルにしているためであり, 中心の強度(0次光)が高くなっているのは, めっき厚さの不均一さによる曲面上CGHの凹凸高さの不均一さが原因であることがわかった. また, 曲面上CGH面内のパターン寸法誤差が $10\mu\text{m}$ 程度では強度分布に影響を与えないという結果も得られており, サイドエッチについては問題ない. レベル数を大きくすること, および凹凸高さの製作精度を向上させることで強度分布を改善することができる.

回折光をアクリル板に約1秒照射した結果, 図12に示すように約 $1\text{mm}\times 4\text{mm}$ のほぼ設計値どおりの大きさのバーンパターンが得られた. ただし, 溝の深さは一様でなく, 図11に示した強度分布を反映して中心部分が深くなっている.

5. 結言

銅の放物面鏡上にCGHを形成した炭酸ガスレーザー用の曲面上CGHの設計と製作を行い, 実際にビーム整形が行えることを実験で確かめた.

曲面上CGHの作製においては曲面上への描画のた

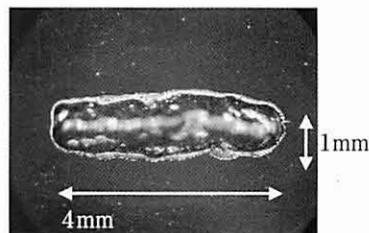


図12 整形ビームのバーンパターン(アクリル)

Burnt pattern by shaped beam from the curved surface CGH

めに, Z軸方向のステージとサーボ機構を追加したレーザー描画装置を用いた. これにより, 曲面形状に応じて描画時の焦点位置を自動調整できるようにした. 銅の微細凹凸形状の作製では, パラジウムをエッチングストップ層としたエッチング手法を用いた. 製作した曲面上CGHは2レベルであり, 凹凸高さは $3.1\sim 3.9\mu\text{m}$ (設計値 $3.75\mu\text{m}$), エッチング面の粗さが $0.04\mu\text{mRa}$ であった.

素子の評価実験を低出力の炭酸ガスレーザーを用いて行った結果では, 目標とする回折強度分布に近い分布と大きさの像が観察された.

得られた回折光の強度分布に多数の針状のピークが含まれるのは, 作製した素子が2レベルの凹凸形状を持つ素子であったためであり, 素子をマルチレベル化することで改善できる. また, 回折像中心の強いピーク(0次光)を除くためには, 曲面上CGHの凹凸高さの製作精度を向上させることが重要であり, 実際には一様な銅めっきを実現することが今後の課題である.

参考文献

- 1) H. Hagino, S. Noguchi and K. Masui: Proceedings of the 13th International Symposium for Electromachining ISEM XIII Vol.2, Fundacion Tekniker, (2001) p.829
- 2) 門屋輝慶, 篠原 茂, 久保 毅, 福島龍太: シンポジウム「レーザー表面改質の現状と今後の展開」, 社団法人日本溶接協会表面改質技術研究委員会, (2001) p.9
- 3) Ch. Haupt, M. Pahlke, R. Krupka and H. J. Tiziani: Appl. Opt. **36** (1997) p.4411
- 4) 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: SEIテクニカルレビュー, **153**(1998) p.119
- 5) C. E. Cole, S. C. Noden, J. R. Tyrer and P. A. Hilton: ICALEO1998, (1998) p.84
- 6) 萩野秀樹, 朴 忠植, 加藤暢宏, 三俣真理, 菊田久雄, 岩田耕一: 精密工学会誌, **69** (2003) p.417