

称号及び氏名 博士（工学） 萩野 秀樹

学位授与の日付 平成 22 年 3 月 31 日

論文名 「高出力レーザーを用いた表面処理のための回折光学素子に関する研究」

論文審査委員 主査 菊田 久雄

副査 三村 耕司

副査 杉村 延広

論文要旨

高出力レーザーを用いた加工は、切断・穴明け、溶接・接合、表面処理、マーキングなど、幅広い用途で利用されている。このうちレーザー表面処理は、レーザー光を照射することにより試料表面の硬さや耐食性などの特性を改善し、機能を高める処理である。レーザー光が照射される箇所での局所的な処理が行えることから、加熱による加工物の変形や材質の劣化が小さいという利点がある。さらに、照射条件を選択することにより、熔融や蒸散まで、多様な処理が行える。ギアの接触面への局所焼入れ処理などが期待されている。

レーザー表面処理の光源には、比較的安価で高い出力が得られる炭酸ガスレーザーが用いられている。しかし、炭酸ガスレーザー光の波長は $10.6\mu\text{m}$ であり、金属材料への光吸収率が低い。そのため、通常、吸収剤を塗布して処理が行われているが、処理結果にばらつきを生じる原因となっている。一方、半導体レーザーやファイバレーザーの高出力化が進み、炭酸ガスレーザーと同程度の出力が得られるようになってきた。これらのレーザー光は近赤外線であり、金属材料への吸収率が高いことから、エネルギーの利用効率の高い表面処理が行える。また、近赤外線の光は光ファイバ伝送が可能のため、3次元形状をもつ表面に対する処理も容易になる。

光エネルギーの利用効率を向上させるもう一つの方法として、レーザー光の強度分布を制御する方法がある。レーザーからの光を直接試料に照射した場合、不要な箇所にもレーザー光が照射されて、ひずみの増大や材質の劣化が生じ、加工品質の低下を招く。そのため、試料の必要な箇所に必要な強度のレーザー光を照射し、不要な箇所にはレーザー光が照射されないように加工対象に応じてレーザー光の強度分布を整形することが望まれる。この目的のために、カライドスコープ方式やスキャニングミラー方式など、様々な強度分布整形方法が考案されている。なかでも、計算機ホログラム (Computer Generated Hologram, CGH) と呼ばれる回折光学素子を用いる方式は、単純な光学系で複雑な強度分布が実現できることから、その利用が期待されている。しかし、CGH をレーザー表面処理に適用する試みは複数報告されているものの、次の理由から CGH が広く用いられるには至

っていない。

炭酸ガスレーザに対しては、1kW以上の高いレーザ光強度に対する耐久性のあるCGHが実現できていない。耐久性のあるCGHを実現するには、反射率が高く、熱伝導性に優れた銅基板を用いた反射型CGHが適している。この銅を基板とする反射型CGHの課題は、表面の微細な凹凸形状の製作方法である。エッチングによって表面形状を製作すると、銅基板の表面が粗くなるため、光学素子として利用できない。J.R.Tyrerらは銅平板の表面にフォトレジストで精密な微細形状を形成し、表面を金コートした反射型CGHを製作しているが、微細形状の素材にフォトレジストを用いるため耐熱性がない。

一方、半導体レーザを光源とした光ファイバ伝送のシステムにおいては、CGHの設計方法が確立されていない。複数の半導体レーザから射出された光は光ファイバ内で全反射を繰り返して出力されるため、CGHに入射する光はコヒーレントでない。そのため、従来のコヒーレント光に対するCGHの設計手法をそのまま適用することができない。また、レーザ光の強度分布制御においては、表面処理のための適切な強度分布を設定する手法が確立されていない。焼入れ処理を例に、直感に基づいて幾つかの強度分布が試されているにすぎないのが現状である。

以上の背景から、本研究では、高出力レーザによる表面処理において、レーザ光の強度分布を制御するための回折光学素子であるCGHの開発を目標に、次の三つの取り組みを行った。(1)高出力炭酸ガスレーザ光に対して耐久性のある銅製反射型CGHを製作する技術として、パターンをもつフォトレジストでマスクされた銅基板に銅めっきを施すプロセスを繰り返すことで、多段の表面微細構造を実現する「マスクめっき法」を考案し、放物面銅基板上に高性能なCGHを製作する技術を確立した。

一方、(2)光ファイバで伝送された高出力半導体レーザ光に対するCGHの設計手法として、光ファイバ端面を位相関係のない点光源の集まりと考える方法を提案し、実際に石英基板を用いた透過型CGHを製作して、設計どおりの光強度分布が得られることを確かめた。さらに、(3)レーザ焼入れを例に、熱解析を取り入れて、焼入れ硬化深さを均一にするための光強度分布を決定する方法を提案し、その効果を実証した。

本論文の構成は以下の通りである。

第1章では、レーザ表面処理の現状と高出力レーザ加工にCGHを適用するための課題を述べることで、本研究の目的を明確にした。

第2章では、高出力炭酸ガスレーザ用のCGHとして、銅の放物面鏡上にバイナリー形状のCGHを製作する方法について述べている。放物面鏡にCGHを製作することで、集光機能と強度分布整形機能を併せもつ光学素子が実現できる。曲面基板上にCGHのパターンを描画するためにレーザ描画装置のフォーカス機能の改造を行った。また、パラジウムのエッチングストップ層を使ったウェットエッチング法により表面粗さの小さいCGHを放物面鏡上に製作することができた。試作したCGHを用いることで、集光レンズを用いない光学系でレーザ光の強度分布が整形されることを示した。回折効率は65.7%であり、強度分布には多数の針状のノイズが含まれていた。ノイズの原因を検討した結果、CGHがバイナリーの表面形状であること、および、製作における表面凹凸の高さの誤差によるものであることが分かった。

第3章では、強度分布に現れる針状のノイズを低減させるために、CGHのマルチレベル化を実現する方法について述べている。ここでは、平面の銅基板に、フォトレジストのパターンをマスクとして基板へ銅めっきを繰り返すマスクめっき法によって8段階の表面形状をもつCGHを試作し、回折効率が69.2%に向上したことを示した。このCGHの製作においては、均一なめっき厚さを

確保するための銅基板の保持方法を考案した。試作した CGH を高出力炭酸ガスレーザー加工機に搭載し、強度分布整形の機能を確認することができた。また、マーキング用の CGH を試作し、アクリル樹脂へのマーキング試験を行い、CGH を用いることにより複雑な強度分布に整形できることを示した。

第4章では、銅の放物面鏡上にマルチレベルの CGH を製作した結果について述べている。第2章で述べたフォーカス機能の改造を行ったレーザー描画装置と、第3章で述べたマスクめっき法を用いることで、曲面上に多段構造をもつ CGH を試作した。試作した CGH では、レンズを用いずに光強度を整形することができ、かつ、ノイズの少ない光強度分布を得ることができた。また、1.5kW の高出力炭酸ガスレーザー光に対して耐性があることを確かめた。さらに、この CGH を使って鉄鋼材料表面の溶融試験を行った。矩形に整形されたレーザー光強度分布を利用すると、通常の強度分布での処理に比べて、溶融幅と溶融深さを容易に制御できることが分かった。

第5章では、光ファイバで伝送された高出力半導体レーザー光に対する CGH の設計手法の提案、および、レーザー焼入れにおける硬化深さを均一にするための強度分布の設定手法について述べている。光ファイバに対する CGH の設計では、光ファイバの射出面を空間的にインコヒーレントな光源と見なして回折光強度分布を見積もる手法を提案した。また、レーザー焼入れを例に、有限要素法にもとづく熱解析を取り入れて、焼入れ硬化深さを均一にするための光強度分布の決定方法を提案し、その効果を実証した。製作した CGH を使っての焼入れ実験では、強度分布整形により硬化深さの均一性を向上させることができることを示した。また、硬化部の機械的特性を表面硬さ試験および摩耗試験により評価した。

第6章では、本研究で得られた結果について総括するとともに、高出力レーザーを使った表面処理に CGH を適用していくための今後の課題について述べている。

審査結果の要旨

本論文は、高出力レーザを用いた表面処理加工において、回折光学素子を用いて効率的な加工を施すためのレーザ光のビーム整形法について研究したものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 高出力炭酸ガスレーザのビーム成型用回折光学素子として、銅の放物面鏡上にバイナリー形状の計算機プログラム (CGH) を製作する方法を考案し、集光機能とビーム形状の整形機能を併せもつ光学素子を実現した。広い範囲でフォーカス機能を有するレーザ描画装置を製作し、これを用いて曲面基板上へのCGHのパターン描画を可能にした。曲面上に凹凸パターンを持つ銅製のCGHは、耐光性をもつとともに集光機能を有する新しい回折光学素子である。
- (2) 銅製CGHのビーム整形の品質を向上させるために、平面銅基板上に多段階の凹凸形状をもつCGHの作製方法として、フォトレジストのパターンをマスクとして基板へ銅めっきを繰り返すマスクめっき法を考案し、回折効率の向上と針状のノイズを低減することに成功した。また、試作したCGHを高出力炭酸ガスレーザ加工機に搭載し、アクリル樹脂へのマーキング試験を行うことで、ビーム整形の効果を実証した。
- (3) 銅の放物面鏡上に多段階の凹凸形状を持つCGHを試作することで、集光レンズを用いずにビーム形状を整形し、かつ、ノイズの少ない光強度分布を発生させる回折光学素子が実現できることを示した。また、試作したCGHが1.5kWの高出力炭酸ガスレーザ光に対して耐性があることを実証するとともに、鉄鋼材料表面の熔融試験によって整形ビームを用いることで熔融幅と熔融深さを容易に制御できることを示した。
- (4) 光ファイバで伝送される高出力半導体レーザ光に対するCGHの設計手法として、光ファイバの射出面を空間的にインコヒーレントな光源と見なして回折光強度分布を求める手法を提案した。また、有限要素法にもとづく熱解析を取り入れて、焼入れ硬化深さを均一にするための光強度分布の決定方法を考案し、その効果を実証した。

以上の研究成果は、高出力レーザによる表面処理を高効率化ならびに高品質化するものであり、この技術分野の発展に貢献するところ大である。また、申請者が自立して研究活動を行うに必要な能力と学識を有することを証したものである。