



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

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2010-07-26 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 萩野, 秀樹 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24729/00000033

大阪府立大学博士論文

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

2010年2月

萩野秀樹

目次

第1章 序論	1
1.1 レーザ表面処理の現状	1
1.1.1 レーザ表面処理の特長と種類	1
1.1.2 レーザ表面処理の課題	2
1.2 計算機プログラムを用いたレーザ加工と課題	6
1.3 本研究の目的と取り組み方法	8
1.4 本論文の章構成	9
第2章 反射型曲面バイナリーCGH の設計および製作方法	10
2.1 CGH の形状	10
2.2 反射型 CGH の基礎式	11
2.3 CGH 反射後の光路にレンズを挿入した場合の観測面の光波	15
2.4 反射型曲面 CGH の設計	19
2.5 反射型曲面バイナリーCGH の製作	26
2.6 反射型バイナリーCGH を用いたレーザ光強度分布整形実験	30
2.7 まとめ	32
第3章 反射型平面マルチレベル CGH	33
3.1 反射型平面マルチレベル CGH の設計と製作	33
3.1.1 反射型平面マルチレベル CGH の設計	33
3.1.2 マスクめっき法	35
3.1.3 平面マルチレベル CGH の形状評価	37
3.1.4 反射型平面マルチレベル CGH によるレーザ光強度分布整形	38
3.1.5 平面マルチレベル CGH の高出力炭酸ガスレーザへの適用	43
3.2 マーキング用 CGH の開発	45
3.2.1 マーキング用 CGH の設計	45
3.2.2 マーキング用 CGH の製作	46
3.2.3 マーキング用 CGH による強度分布整形の評価および マーキング加工実験	49
3.3 まとめ	50
第4章 反射型曲面マルチレベル CGH の開発	52
4.1 反射型曲面マルチレベル CGH の設計	52
4.2 めっき条件の最適化	53
4.3 曲面マルチレベル CGH の製作	56
4.4 低出力炭酸ガスレーザを用いた強度分布整形実験	57
4.5 鉄鋼材料の熔融に及ぼす強度分布整形の効果	57
4.6 まとめ	60
第5章 高出力半導体レーザ用 CGH	61
5.1 硬化部の深さ分布を均一にするレーザ光強度分布の検討	61
5.1.1 レーザ光吸収率の見積もり	61
5.1.2 光ファイバで伝送されたレーザ光用 CGH の設計方法	66

5.2	CGH の設計	69
5.3	CGH の製作と評価	73
5.3.1	CGH の製作	73
5.3.2	CGH を用いた高出力半導体レーザ光の強度分布整形	73
5.4	レーザ焼入れ実験	75
5.4.1	実験方法	75
5.4.2	焼入れ硬化部の形状	75
5.4.3	焼入れ形状のシミュレーションとの比較	77
5.4.4	硬化部の機械的特性	78
5.5	まとめ	81
第 6 章 結論		82
付録		85
参考文献		89
謝辞		92

第 1 章 序論

本章では、高出力レーザー表面処理の研究を行うにあたって、その背景となるレーザー表面処理の現状と課題について概説した後、本研究の目的および論文の構成を述べる。

1.1 レーザ表面処理の現状

1.1.1 レーザ表面処理の特長と種類

1960年にMaimanがはじめてルビーレーザーの発振に成功[1]して以来、様々なレーザー光源が開発され、計測や通信、加工、医療などの広い分野で用いられている。レーザー光は小さなスポットへ集光でき、高密度なエネルギー熱源として利用できることから、加工分野では切断・穴あけ、溶接・接合、表面処理、マーキング・彫刻や微細加工など、幅広い用途に利用されている。また、加工対象も金属だけでなく、機械加工が難しいセラミックスや樹脂、木材など様々である[2]。

本研究は、高出力レーザーによる金属材料の表面処理を対象にしている。レーザー表面処理は、試料にレーザー光を照射して、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。レーザーによる表面処理の模式図を図 1.1 に示す。適度なスポット径のレーザー光を試料に照射すると、試料は光を吸収して加熱される。照射条件を選択することにより、試料が加熱されるだけの処理から溶融や蒸散（アブレーション）まで、様々な表面処理が可能である[3, 4]。レーザー光による表面処理は、光照射部近傍のみを処理する局所加工である。また、レーザー光は大気や真空のほか、アルゴンや窒素などのガス中も透過するので、レーザー表面処理は種々のガス雰囲気中で処理が可能である。

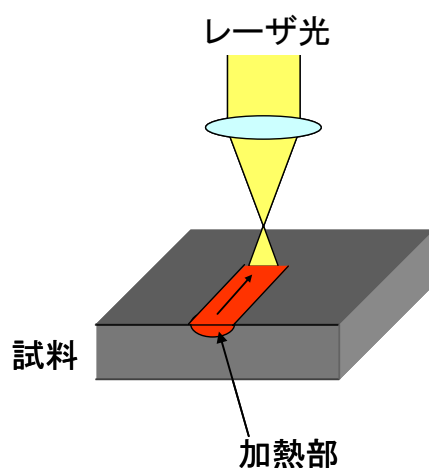


図 1.1 レーザ表面処理の模式図

レーザー表面処理の特長には、

- ①局所処理が可能であり、加工物の変形や材質の劣化が小さい
- ②エネルギー密度と照射時間の組み合わせで、加熱だけのプロセスのほか、溶融、蒸散まで、多様な処理が可能
- ③レーザー強度と照射範囲、照射時間の制御が容易で、オンライン加工が可能
- ④大気中でも処理が可能

- ⑤非接触な処理が可能で，被加工物の形状，材質の制約が少ない
- ⑥処理速度が速い

などが挙げられる[5]．図 1.2 はレーザー表面処理の分類を示している[4]．加熱プロセスは，試料にレーザー光を照射して加熱する処理であり，例えば鉄鋼材料の表面焼入れ硬化処理やステンレス鋼の脱鋭敏化処理などがあげられる．試料の溶融をともなう溶融プロセスには肉盛りや合金化などの処理がある．肉盛りは，試料表面に材料を供給しながらレーザー光を照射し，供給した材料と試料のごく表層を溶融させて試料表面に新たな材料を付加する加工法であり，金型や機械部品の補修に用いられている．その他，衝撃硬化やレーザー PVD といったプロセスがある．衝撃硬化は液体中で試料にレーザー光を照射し，集光点付近で瞬間的に発生したプラズマにより試料に衝撃を与え，圧縮応力を付与して硬化させる処理方法である．

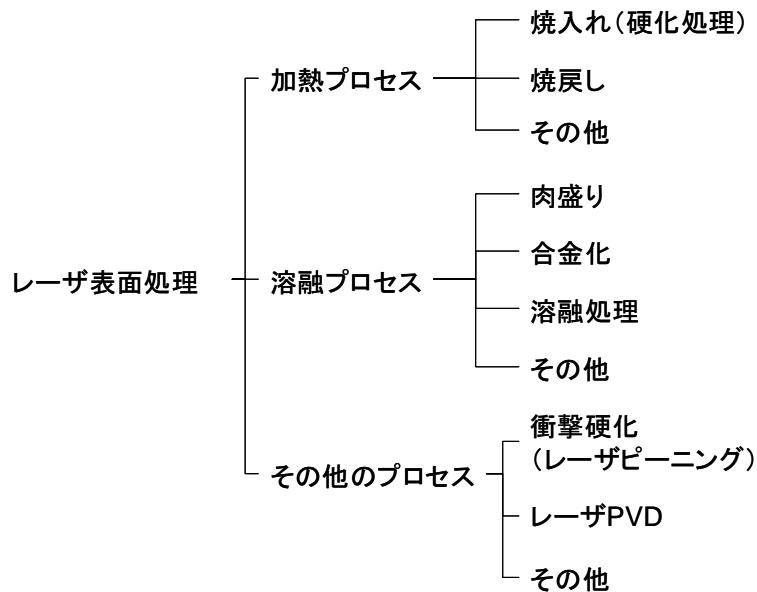


図 1.2 レーザー表面処理の分類

レーザー表面処理は，切断などの他のレーザー加工に比べて，実際の利用は多くない．(財)光産業技術振興協会が行った光産業動向調査[6]によれば，加工用レーザーの用途（2006 年度見込み）において，炭酸ガスレーザーでは 90%以上が切断・穴あけに利用されており，固体レーザー（YAG レーザー，半導体レーザーなど）ではトリミング・リペア 29%，マーキング 26%，溶接 24%，切断・穴あけ 8%である．エキシマレーザーの 98%は半導体プロセスのリソグラフィ用途として用いられている．

しかし，自動車用ギアにおいては，ギア全体に歪みを生じさせずに接触面だけを硬化させる必要があり，レーザー表面処理が最も適した手法となっている．その他，刃物の刃先の硬化処理など，幾つかの限られた用途であるが，レーザーによる表面処理は重要な加工技術となっている．

1.1.2 レーザー表面処理の課題

(a)レーザーについて： レーザー表面処理では，通常，数 mm^2 以上の処理面積が必要とされる．レーザー加工においては数 mm^2 以上の処理面積は比較的大きく，数 kW のパワーが必要になる．そのため，レーザー表面処理に用いられる光源としては，炭酸ガスレーザーと YAG レー

ザが利用されている．とくに炭酸ガスレーザーは，比較的安価で高い出力が得られるため，広く利用されている．YAGレーザーは，炭酸ガスレーザーに比べると，装置の初期費用や維持費用が高いために，表面処理にはあまり使われていない．一方，炭酸ガスレーザーにも課題がある．金属材料の光吸収率は図 1.3 [7]に示すように一般に波長が長いほど低い．炭酸ガスレーザーの波長は $10.6\mu\text{m}$ で，他のレーザー光と比べて波長が長いために，金属材料のレーザー光吸収率が低く，鉄鋼材料では 12~13%程度である．そのため，炭酸ガスレーザーを用いた鉄鋼材料の焼入れでは，試料表面に吸収剤が塗布される．

また，2000 年頃から，高出力半導体レーザーやファイバレーザーといった新しいレーザー光源が製品化されている．これらの新しいレーザーは，メンテナンスが容易で装置の維持管理費用も安価であり，出力強度の安定性も高く，波長が $0.8\sim 1.1\mu\text{m}$ で金属材料の光吸収率も高いといった利点がある．さらに光ファイバによる光伝送も可能で，3 次元形状に対する表面処理も容易になる．今後，これらのレーザーを用いたレーザー表面処理の研究開発が進むことが期待されている．

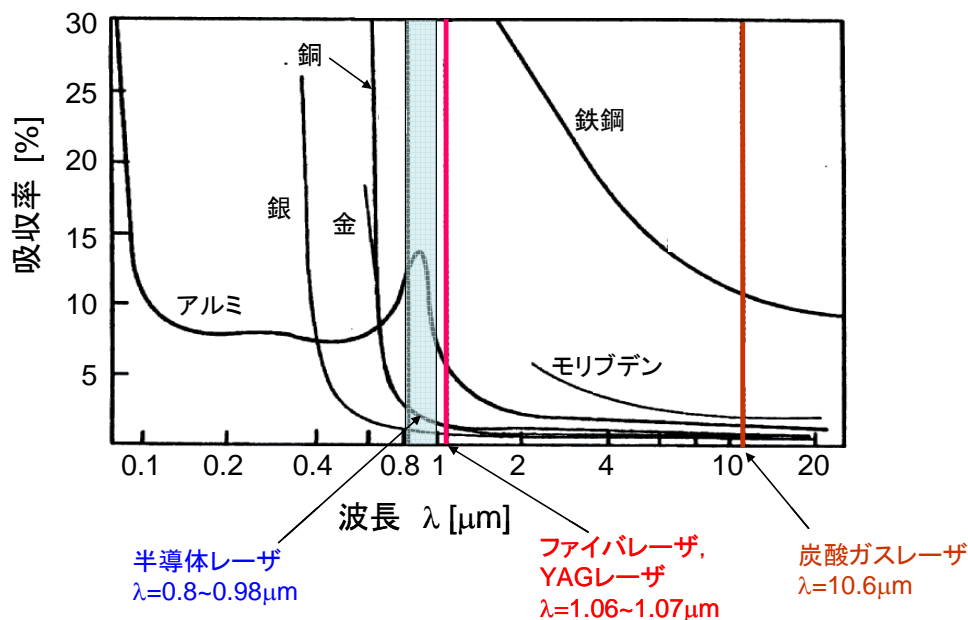


図 1.3 各種金属材料のレーザー光吸収率 [7]

(b) レーザ光強度分布制御： レーザ光の強度分布制御も課題である．レーザー表面処理では，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，加工対象に応じてレーザー光の強度分布を整形し，表面処理を行う研究が多く行われている[2, 3]．例えばレーザーで表面硬化処理（レーザー焼入れ）を行う場合，レーザー光のスポットは通常，図 1.4(a)のように円状をしており，強度分布も中央の強度が強いガウス分布であるため，図 1.4(b)に示すように硬化層の深さは中央が深く，端部で浅くなる．表面硬化処理では，決まった幅と深さの硬化層の形成が求められるため，必要な硬化領域を得るには，必要な領域よりも大きな硬化領域を形成する必要がある．そのため試料には余分に熱エネルギーが投入され，ひずみの増大や材質の劣化を引き起こす．一方，図 1.4(c)のように矩形の強度分布を持つレーザー光を用いることにより，図 1.4(d)に示すような平坦に近い硬化形状を得ることができ，ひずみや材質の劣化を小さくすることができる．

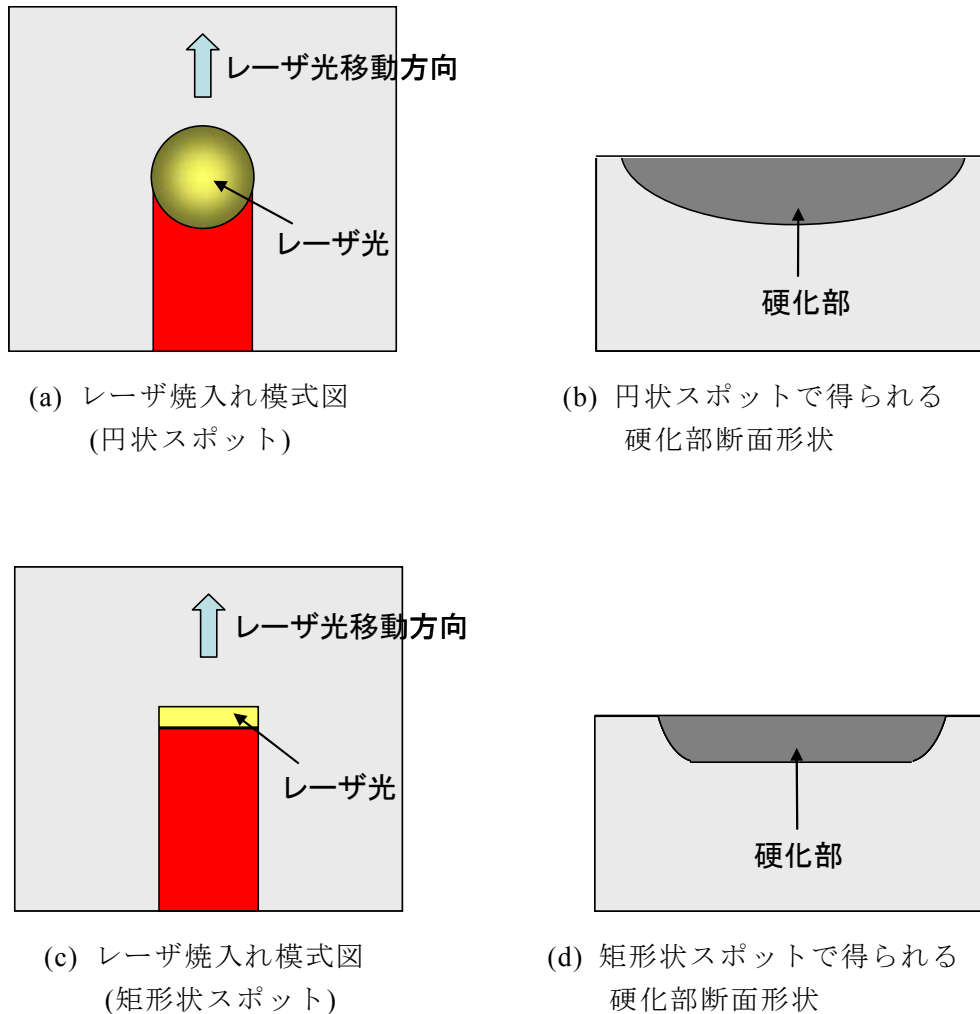


図 1.4 レーザ焼入れにおける課題と対策

代表的なレーザー光の強度分布整形の方式を図 1.5 に示す。カライドスコープは万華鏡とも呼ばれ、内面が鏡でできた筒の中にレーザー光を入射させ、内部での光の多数回の反射によってレーザー光の強度分布を均一化させる素子である[8, 9]。カライドスコープは比較的容易に強度分布を均一化できるが、強度分布の形状は筒で表現できる形に限られ、強度に分布を付けることはできない。またカライドスコープによるエネルギーの減衰は通常 10~15% 程度であり[9]、エネルギーの利用効率が低いという課題もある。

スキヤニングミラー方式は、2 枚のミラーを使ってレーザー光を試料上で高速に走査することで、見かけ上の強度分布を整形する方法である[10]。コンピュータで走査データを作成するだけで、任意のビーム形状と強度分布をつくることができる。しかし、ミラーを可動させる必要があり、システムが複雑なために高価な装置になる。セグメントミラー方式は、複数の小さなミラーを凹面鏡に沿って貼り付けたもので、個々のミラーからの反射光が重畳されて、均一な強度分布になる[11, 12]。実現できる強度分布の形状が限られていること、セグメントミラーの製造が難しく、コストが高いといった課題があり、その利用は限られている。フライアイレンズは小さなレンズをアレイ状に並べて、各レンズからの光を重畳させてレーザー光の均一化を図る光学素子である[2]。セグメントミラーと同様、製造が難しく、コストが高いといった課題がある。

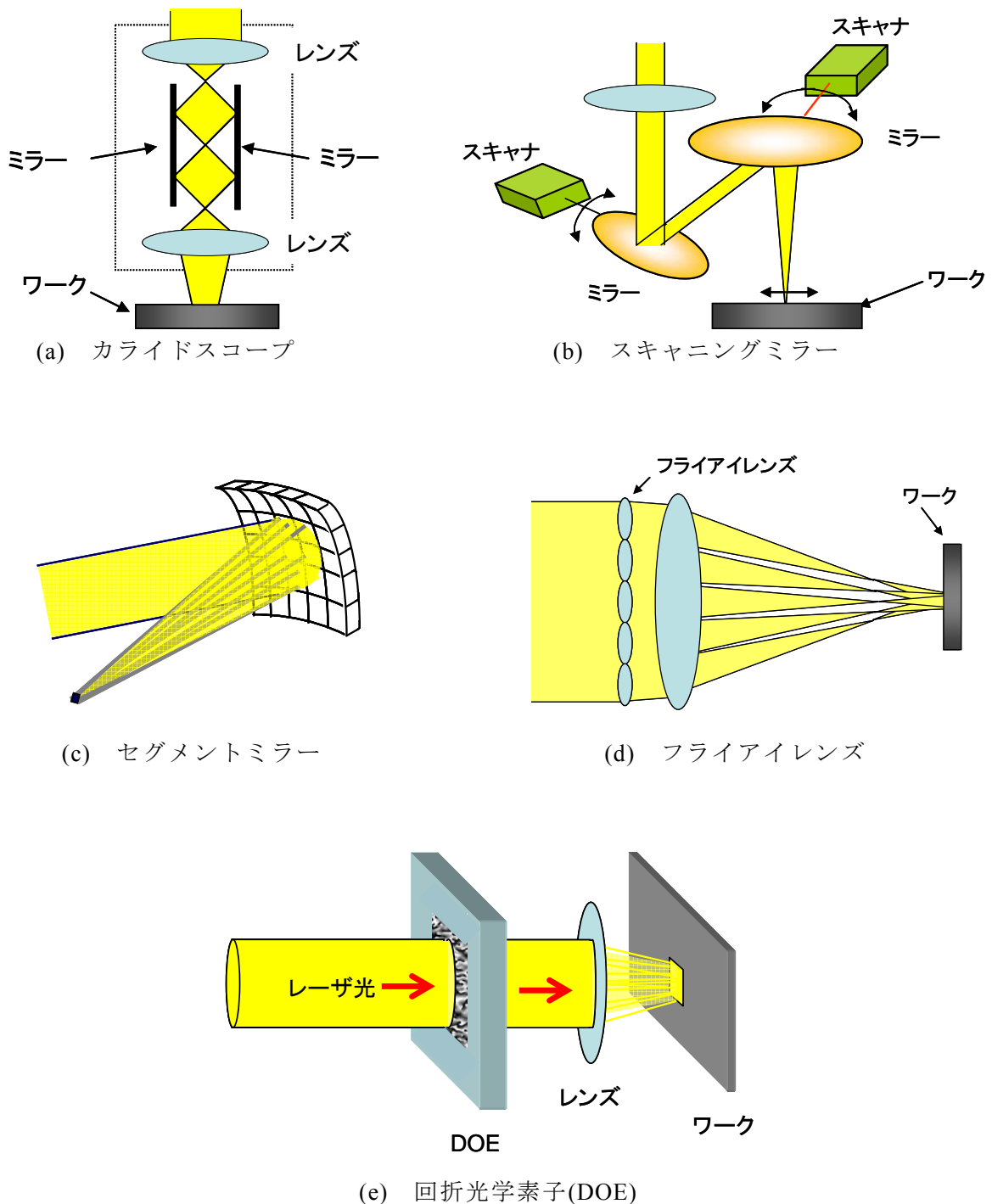


図 1.5 レーザ表面処理に用いられる代表的な強度分布整形方法

一方、回折光学素子(Diffractive Optical Element, 以下 DOE)を用いて強度分布を整形する方法がある[13-19]. DOE は基板表面に微細な凹凸形状を有し、形状による光の回折現象を利用してレーザー光の強度分布を整形する素子である[2, 20, 21]. 適当な表面凹凸形状を設けることで、レンズの焦点位置で任意の強度分布が実現できる. 他の強度分布整形手法と比べると、複雑な光強度分布が実現できること、DOE さえ用意すれば複雑なシステムを必要とせず強度分布の整形ができることなどが利点である. このような DOE は計算機を用いて設計することができ、計算機ホログラム (Computer Generated Hologram, 以下 CGH) と呼ばれる.

1.2 計算機プログラムを用いたレーザ加工と課題

1.1 節で述べた背景をもとに、本研究では DOE を用いたレーザ光強度分布整形技術について検討を行う。レーザ加工の分野における DOE の実用例は多くないが、DOE をレーザ加工に適用する試みは以前より行われている。レーザ光の強度分布を制御できるという特長に着目して、DOE をレーザ加工に初めて適用したのは J.M.Moran である (1971 年) [22]。彼はルビーレーザ (波長 694nm) に DOE を適用し、レーザ光強度分布整形の特性を調べるとともにレーザ光を 2 つのスポットに分け、ガラス基板上の厚さ $0.12\mu\text{m}$ のタンタルフィルムに一度に 2 箇所穴あけ加工を行った。これ以降、DOE をレーザ加工に用いる研究が行われていくが [23, 24]、高出力レーザを用いた加工や素子製作技術が未発達であったため、DOE を利用したレーザ加工に関する研究も多くはなかった。

しかし、レーザ加工技術の進歩、素子設計のための計算機性能の向上、素子製作のための微細加工技術の進歩により、1990 年代から DOE の中でも CGH を利用したレーザ加工が検討されはじめた [25-27]。とくに、高出力レーザの普及とともに高エネルギーのレーザ加工への適用も検討されはじめ [13-19, 28-41]、切断 [13, 30]、穴あけ [25, 29, 34-37]、溶接 [32, 33]、はんだ付け [13, 31]、焼入れ [13, 14, 17]、肉盛り [15, 16, 18, 19] といった様々な用途への適用が試みられている。

CGH の模式図を図 1.6 に示す。CGH は表面凹凸形状が複数段の階段形状で構成されている。図では凹凸高さを白黒の濃淡で表している。このような CGH を透過または反射した光は、表面凹凸形状にしたがって回折するので、その回折像は加工用の光強度分布として利用される。なお、凹凸形状が 1 段だけで構成される CGH はバイナリー CGH と呼ばれ、2 段以上のものはマルチレベル CGH と呼ばれる。

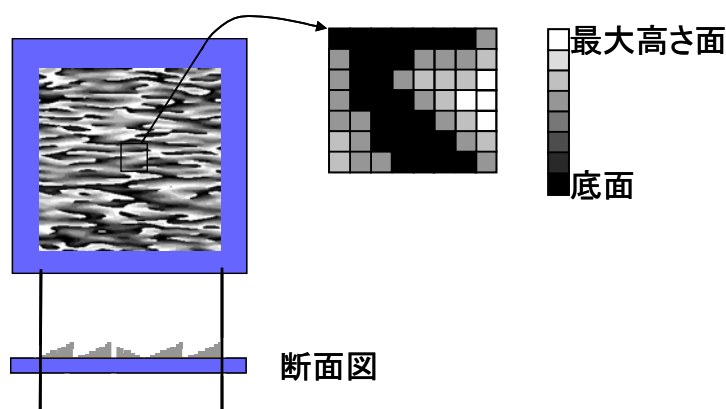


図 1.6 CGH の模式図

CGH を高出力レーザ加工に適用することにおいて、現状では以下の三つの課題がある。

- ①高いレーザ光強度に対する CGH の耐久性
- ②光ファイバ伝送のレーザ光に対応した CGH の設計方法
- ③レーザ表面処理に適切な光強度分布の設定方法

高出力レーザに CGH を適用するには高いレーザ光強度に耐久性のある素子を実現しなければならない。高出力レーザ加工の多くは光源に炭酸ガスレーザが用いられており、CGH の適用例もほとんどが炭酸ガスレーザである。CGH の形状には透過光を利用する透過型と反射光を利用する反射型があるが、反射型の方が裏面から容易に冷却できるため、高出力レーザに対する耐久性が高い。また、透過型 CGH の素材には、炭酸ガスレーザ光の透過率が高いセレン化亜鉛 (ZnSe) が用いられる [29, 34-40] が、ZnSe 結晶は高価であり、

毒性があること、基板表面の微細加工も容易でないなどの理由から、ZnSeのCGHは高価な光学部品になっている。また、透過型CGHがレーザ光の一部を吸収して、膨張し、変形する熱レンズ効果と呼ばれる問題もある。したがって、炭酸ガスレーザ用のCGHには反射型の方が優れている。

反射型CGHの素材には、シリコン[13, 14]や銅[28]が用いられる。シリコンは、電子デバイスの製作に用いられるフォトリソグラフィとエッチングの技術を用いて微細な表面形状を容易に形成できるという利点があるが、レーザ光の反射率や熱伝導率が小さく、強いレーザ光に対応するには冷却方法を工夫しなければならない[14]。一方、銅はシリコンよりも反射率および熱伝導率の点で優れており、炭酸ガスレーザ用のCGHの素材として適している。銅を素材とするCGHの課題は表面の凹凸形状の製作方法である。J.R.Tyrerらは銅平板の表面にフォトレジストで微細形状を形成し、表面に金をコーティングした反射型CGHを製作し、4kWの炭酸ガスレーザ光の強度分布整形を行っている[28]。しかし、形状がフォトレジストで構成されているため、高いレーザ光強度に対する耐久性に課題がある。C.Hembsollnerらは、銅めっきで銅の微細形状を形成した回折格子を製作している[42]が、回折格子であるため表面形状は単純な凹凸形状であり、複雑な凹凸形状をもつCGHの製作には至っていない。

また、CGHにより強度分布整形を行うためには、最終的にレンズを用いてレーザ光を集光する必要があるが、炭酸ガスレーザ光は赤外線のために、光軸の調整が面倒である。また、レンズを用いると、先に述べたレーザ光の吸収によるレンズの膨張や変形といった熱レンズ効果の課題が生じる。

以上のことから、高出力炭酸ガスレーザ用のCGHについては、銅製の反射型で集光機能を持ったCGHの開発が求められる。(課題1)

一方、光ファイバから出力されたレーザ光を用いた加工も広く行われており、光ファイバ出力のレーザ光強度分布を整形することも重要である。炭酸ガスレーザの光は光ファイバを透過できないが、近赤外線で発光する半導体レーザの光は透過する。しかし、光ファイバ伝送のレーザ光にCGHを用いてレーザ加工を行った研究例はない。その理由の一つとして、光ファイバから出力されるレーザ光が、炭酸ガスレーザのような単純なコヒーレント光でないために、従来のCGHの設計手法がそのままでは適用できないことが挙げられる。例えば、高出力半導体レーザは、高い光強度を得るために図1.7に示すように多くの半導体レーザ素子で構成されている[2, 43, 44]。複数のレーザ素子を積層することで数100Wのレーザ光が得られ、さらに複数の波長の光を合わせることで数kWのレーザパワーが得られる。光ファイバ伝送では、これら半導体レーザの光を集めて、コア径0.3~1.0mmの光ファイバで加工物近傍に伝送される[45]。各半導体レーザからの光には互いに位相の相関関係が無く、波長より十分大きな径をもつ光ファイバ中で全反射を繰り返すことで、その出力光の空間的コヒーレンスは失われる。そのため、コヒーレント光を前提とした従来のCGHの設計手法が適用できない。

以上のことから、光ファイバ伝送の高出力半導体レーザ用CGHの設計手法の確立が課題である。(課題2)

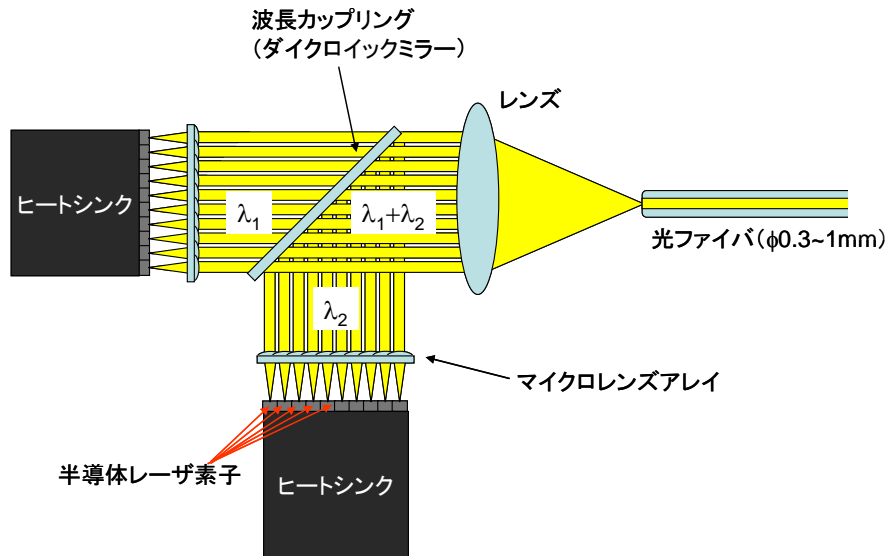


図 1.7 高出力半導体レーザー発振器の構成

CGH を利用してレーザーの強度分布整形を行う最大の利点は、スポット形状の整形だけでなく、その強度分布についても複雑に制御できることである。この特長を利用すると、試料表面付近の温度分布をより詳細に制御できるため、高度な表面処理が可能になる。例えば、幅の狭い焼入れ処理を行う場合、図 1.4(c)に示した単純な矩形形状では均一な焼入れ深さを得ることはできない。矩形両端の光強度を中央部より強くすることで、より均一な焼入れ深さが得られる。このように、CGH を使って意図的に強度分布を整形することで、より高度な表面処理を行おうとする研究がある[13-19]。しかし、適切な光強度分布の設定プロセスが確立されておらず、強度分布の最適化も行われていない。現状では、焼入れ実験と熱解析シミュレーションの結果を比較するにとどまっております[17]、CGH の機能を有効に利用する設計手法の確立には至っていない。

以上のことから、表面処理における適切な光強度分布の設定手法の確立も課題である。(課題 3)

1.3 本研究の目的と取り組み方法

本研究は、高出力レーザーによる表面硬化処理（レーザー焼入れ）を例に、CGH を利用して光強度分布の整形を行うことで硬化層の均一化をはかる技術の開発を目的としている。この目的を達成するために、下記の取り組みを行う。

高出力炭酸ガスレーザー用の CGH を銅放物面鏡の曲面上に製作することで、強度分布整形機能と集光機能を兼ね備えた光学素子を実現する。銅基板表面に微細形状を製作するために、C.Hembd-sollner が行ったフォトリソグラフィと銅めっきを組み合わせる手法[42]を利用する。この手法を使って複数回のめっきを行うことで多段表面形状をもつ高性能な銅製の反射型 CGH を製作する。本論文では、このめっきによる表面多段形状の製作法をマスクめっき法とよぶ。

一方、曲面基板への微細形状のパターニングを可能にするために、レーザー直接描画装置を曲面描画に追従するように改造する。改造した描画装置を用いて銅の反射型曲面 CGH を製作し、高出力炭酸ガスレーザー加工機に搭載し、CGH により整形されたレーザー光強度分布を評価する。また、このレーザー光を鉄鋼材料に照射して、試料の熔融特性を調べることで強度分布整形の効果を確かめる。

次に、波長 808nm の高出力半導体レーザを光源とした光ファイバ伝送の光に対する CGH の設計手法として、空間的コヒーレンスのない光源についての CGH の設計手法を示す。実際に透過型の CGH を設計、製作し、それを用いて半導体レーザ光の強度分布整形を行った結果を観察することで、この設計手法の原理検証を行う。

また、上記の CGH の設計において、熱解析シミュレーションを取り入れることで、硬化層の深さ分布が均一になる光強度分布を設定することを試みる。製作した CGH を使ってレーザ焼入れ実験を行い、得られた硬化層の断面形状と設計時の断面形状を比較することで、熱解析シミュレーションを取り入れた光強度の設定手法の効果と課題について検討を行う。

1.4 本論文の章構成

本論文は、本章を含めて本文 6 章と参考文献、および謝辞より構成されている。

第 2 章から第 4 章においては、高出力炭酸ガスレーザ用の銅製の反射型曲面 CGH の実現について取り組んだ結果について述べている。第 2 章では反射型曲面 CGH の基本的な設計方法について述べるとともに、曲面に CGH パターンを設けるためのレーザ描画装置の改造を行ったので、その概要について紹介する。また、実際に銅の放物面鏡上にバイナリー形状の CGH を製作し、強度分布整形を行った結果について述べる。

第 3 章では、マスクめっき法による銅平面基板上へのマルチレベル CGH の製作を行った結果について述べる。製作した CGH による光強度分布の評価を行い、表面形状をマルチレベル化することで回折光の強度分布の形状が改善されたことを示す。また、製作した CGH を高出力炭酸ガスレーザ加工機に搭載し、実機での光強度分布の整形実験を行った結果について述べる。一方、銅製のマルチレベル CGH を利用することで、炭酸ガスレーザにおいても複雑な光強度分布が実現できることを示すために、マーキング用 CGH の開発に取り組んだ。また、この CGH の製作を通して、めっき層の凹凸高さの精度を向上させるためにめっきプロセスの改善を行ったので、その結果についても述べる。

第 4 章では、第 2 章で述べた曲面上へのレーザ描画技術と第 3 章で述べた CGH のマルチレベル化技術を組み合わせ、放物面鏡基板上にマルチレベル CGH を製作した結果について述べる。また、CGH を高出力炭酸ガスレーザ加工機に搭載し、整形したレーザ光を鉄鋼材料に照射し、熔融特性について調べ、強度分布整形の効果について検討した結果についても述べる。

第 5 章では、高出力半導体レーザを光源とする光ファイバ出力のレーザ加工機について、強度分布整形のための CGH の設計手法について述べる。ここでは、光ファイバの射出端面を空間的にインコヒーレントな光源と見なし、畳み込み積分に基づいて回折光強度分布を算出する。これを従来のコヒーレント光に対する CGH の設計手法と組み合わせることで、光ファイバ伝送型レーザ加工機のための CGH の設計を行った。本章では、その手順を示すとともに、実際に透過型 CGH を製作し、設計どおりの強度分布に整形できていることを示す。

また、熱解析シミュレーションを取り入れた CGH の設計を行い、幅 4mm の硬化層に対して焼入れ深さが均一になる光強度分布を設定した。設計に基づいて製作した CGH を使って焼入れ実験を行うことで、熱解析シミュレーションを取り入れた光強度分布の設定手法の効果と課題について検討を行ったので、その結果について述べる。その他、焼入れ表面についての硬さ試験および摩耗試験を行った結果についても述べておく。

第 6 章では、本研究で得られた結果をまとめるとともに、レーザ加工における CGH の利用についての課題と展望について述べる。

第2章 反射型曲面バイナリ-CGH の設計および製作方法

本研究では銅を素材とした反射型 CGH の実現を目指している。本章では、銅の表面上にバイナリ形状の CGH の実現に取り組んだ結果について述べる。はじめに反射型曲面 CGH の基本的な設計方法について述べる。次に、曲面基板に CGH パターンを描画できるように、レーザ描画装置を改造し、その装置を用いて銅の表面上にバイナリ形状の CGH を製作し、強度分布整形を行った結果について述べる。

2.1 CGH の形状

反射型 CGH を用いた代表的なレーザ加工の模式図を図 2.1 に示す。レーザから出力された光は CGH で反射された後、レンズによって集光され、レンズの焦点位置で目標とする強度分布に整形される。この光学系では CGH とレンズの二つの素子が必要になる。そこで本研究では、図 2.2 に示すような炭酸ガスレーザの集光に用いられる放物面鏡上に CGH の凹凸形状を製作し、一つの素子で集光と強度分布整形の機能を持つ素子を開発した。レーザから出力された光は CGH で反射され、基板の放物面鏡の焦点位置で目標とする強度分布に整形される。

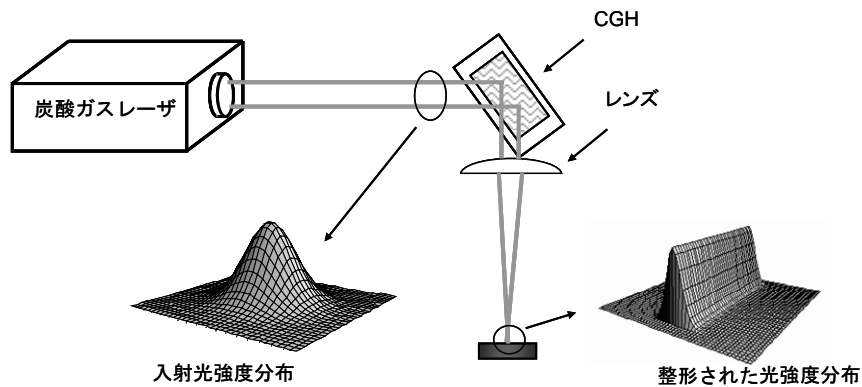


図 2.1 反射型 CGH を用いたレーザ加工の模式図

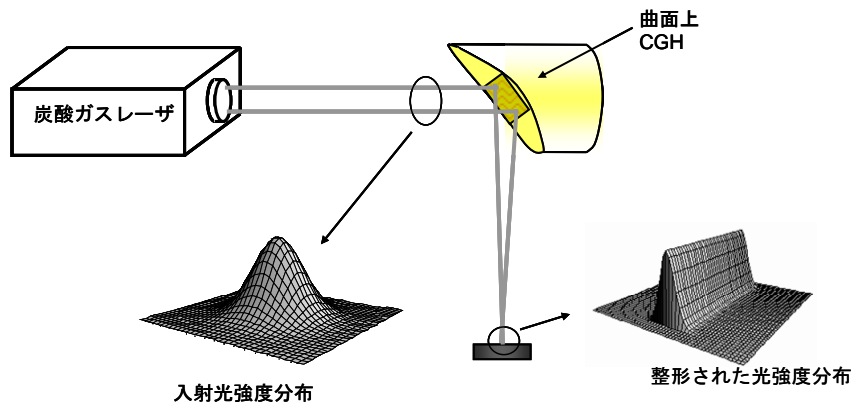


図 2.2 反射型曲面 CGH を用いたレーザ加工の模式図

2.2 反射型 CGH の基礎式

はじめに反射型曲面 CGH 設計のために，入射光と CGH の凹凸形状パターン，整形されたレーザ光強度分布の関係を表す基礎式について検討し，定式化した式をもとに CGH の設計を行った．

図 2.3 のような，光源から入射した光が CGH に反射され，その光を観測面で観察するモデルを考える．簡単のため偏光の影響は無視する．CGH 表面に原点を取り，CGH 表面に対し放線方向に z 軸を取る．入射光の入射面を yz 面とし， y 軸， z 軸に垂直に x 軸を取る．入射光の波数ベクトルを \mathbf{k}_0 ， \mathbf{k}_0 と z 軸のなす角を θ とし，入射光の複素振幅分布 U_0 を

$$U_0(x, y, z) = A_0(x, y, z) \exp[-i \cdot \mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{r}] \quad , \quad (2.1)$$

とする．ただし \mathbf{k}_0 は，

$$\mathbf{k}_0 = (0, 2\pi \sin \theta / \lambda, 2\pi \cos \theta / \lambda) \quad ,$$

で表される．また \mathbf{r} は原点から点 (x, y, z) までの位置ベクトルを表す．また，観測面と CGH とのなす角を α とする．

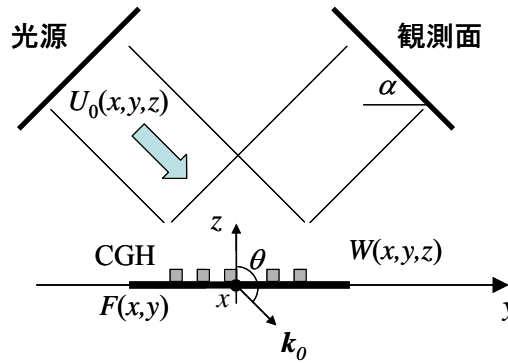


図 2.3 反射型 CGH のモデル

光波が CGH で反射した際に振幅に与えられる作用を表す関数を $F(x, y)$ とし，CGH で反射した直後の光波振幅分布を $W(x, y)$ とすると， $F(x, y)$ と $W(x, y)$ の関係は次式のように表される．

$$W(x, y) = U_0(x, y, 0) \cdot F(x, y) \quad , \quad (2.2)$$

次に，観測面上の点 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ における光波 $U(P_2)$ を考える．キルヒホッフ-ホイゲンスの回折積分公式[46]より P_2 点での光波 $U(P_2)$ と CGH で反射した光波振幅 $W(x, y)$ との関係は次式で表される．

$$U(P_2) = \frac{1}{4\pi} \iint \frac{\partial W(x, y)}{\partial \mathbf{n}} \left(\frac{\exp(-ikr_p)}{r_p} \right) - \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \left(\frac{\exp(-ikr_p)}{r_p} \right) W(x, y) dx dy \quad . \quad (2.3)$$

ただし， $k=2\pi/\lambda$ (λ :波長)， \mathbf{n} は xy 面 (CGH 表面) に垂直で z 軸とは逆向きの法線ベクトル， r_p は xy 面上の点 $P_1(x_1, y_1, 0)$ から観測面上の点 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 間の距離である．また，(2.3) 式の積分領域は CGH 面上で光が入射した領域である．

次に(2.3)式の積分について考える．(2.1)式，(2.2)式より，積分内の 1 項目の偏微分は次のように変形できる．

$$\begin{aligned}
\frac{\partial W(x, y)}{\partial \mathbf{n}} &= -\frac{\partial W(x, y)}{\partial z} = -F(x, y)A_0(x, y, 0)\frac{\partial}{\partial z}(\exp(-ik_0 \cdot r)) \\
&= -F(x, y)A_0(x, y, 0) \cdot (-ik_z) \cdot \exp(-ik_0 r) \\
&= W(x, y) \cdot i \frac{2\pi}{\lambda} \cos \theta \quad .
\end{aligned} \tag{2.4}$$

ただし、 k_z は入射光の波数ベクトルの z 方向成分である。また、

$$\left. \frac{\partial A_0(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad , \tag{2.5}$$

である。

積分内の2項目の偏微分は次式のように変形できる。

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \left(\frac{\exp(-ikr_p)}{r_p} \right) = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\exp(-ikr_p)}{r_p} \right) = \left(ik - \frac{1}{r_p} \right) \cdot \frac{\exp(-ikr_p)}{r_p} \cdot \frac{\partial r_p}{\partial z} \quad . \tag{2.6}$$

さらに $k \gg \frac{1}{r_p}$ ($\lambda \ll r_p$) なので、(2.6)式は次式のように表される。

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \left(\frac{\exp(-ikr_p)}{r_p} \right) = \frac{ik \exp(-ikr_p)}{r_p} \left(\frac{\partial r_p}{\partial z} \right) \quad . \tag{2.7}$$

(2.4)式、(2.7)式を(2.3)式に代入すると次式のように変形される。

$$\begin{aligned}
U(P_2) &= \frac{1}{4\pi} \iint W(x, y) \left(i \frac{2\pi}{\lambda} \cos \theta \right) \left(\frac{\exp(-ikr_p)}{r_p} \right) - \frac{ik \exp(-ikr_p)}{r_p} \cdot \frac{\partial r_p}{\partial z} W(x, y) dx dy \\
&= \frac{i}{2\lambda} \iint W(x, y) \left(\frac{\exp(-ikr_p)}{r_p} \right) \left(\cos \theta - \frac{\partial r_p}{\partial z} \right) dx dy \quad .
\end{aligned} \tag{2.8}$$

ただし、(2.8)式は xy 面内における積分なので、常に $z=0$ である。以上より、観測面上の点 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ における光波 $U(P_2)$ は(2.8)式で表すことができる。

ここで、点 $P_1(x_1, y_1, 0)$ から点 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ までの距離 r_p は次式のように表される。

$$r_p = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + z_2^2} \quad . \tag{2.9}$$

次に、図2.3をCGH面と観測面、点 P_1 、点 P_2 の関係を表すように書き直した図を図2.4に示す。図に示すように観測面に u, v, z' 軸をとる。原点 O から観測面にひいた垂線と観測面の交点を O_2 とする。また、 y 軸と v 軸のなす角を α 、 u, v, z' 軸での P_2 点の座標を $(u, v, 0)$ 、 r_0 を OO_2 間の距離とすると、 x_2, y_2, z_2 はそれぞれ、

$$x_2 = u, \quad y_2 = r_0 \sin \alpha + v \cdot \cos \alpha, \quad z_2 = r_0 \cos \alpha - v \cdot \sin \alpha \quad , \tag{2.10}$$

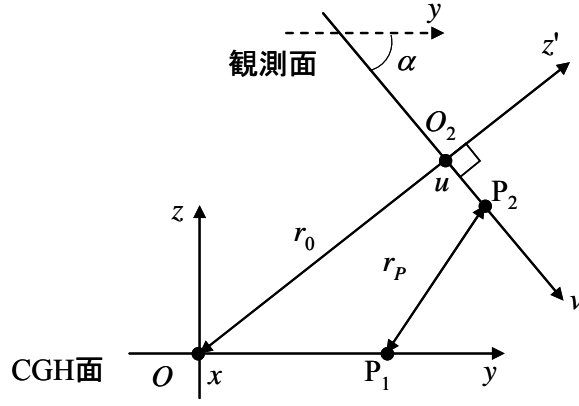


図 2.4 CGH 面と観測面の関係

と表される．(2.9)式に(2.10)式を代入すると，

$$\begin{aligned}
 r_p &= \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + r_0^2 + u^2 + v^2 - 2(x_1 u + r_0 y_1 \sin \alpha + y_1 v \cos \alpha)} \\
 &= r_0 \sqrt{1 + \frac{x_1^2 + y_1^2 + u^2 + v^2 - 2(x_1 u + r_0 y_1 \sin \alpha + y_1 v \cos \alpha)}{r_0^2}} , \tag{2.11}
 \end{aligned}$$

と変形される．これを二項展開すると，

$$\begin{aligned}
 r_p &= r_0 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{x_1^2 + y_1^2 + u^2 + v^2 - 2(x_1 u + r_0 y_1 \sin \alpha + y_1 v \cos \alpha)}{r_0^2} \right\} \\
 &\quad - \frac{1}{8} \left\{ \frac{x_1^2 + y_1^2 + u^2 + v^2 - 2(x_1 u + r_0 y_1 \sin \alpha + y_1 v \cos \alpha)}{r_0^2} \right\}^2 + \dots , \tag{2.12}
 \end{aligned}$$

と変形される．ここで， $r_0 \gg x_1, y_1, u, v$ なので， r_0^{-3} および r_0^{-4} の項を無視すると，

$$\begin{aligned}
 r_p &= r_0 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{x_1^2 + y_1^2 + u^2 + v^2 - 2(x_1 u + r_0 y_1 \sin \alpha + y_1 v \cos \alpha)}{r_0^2} - \frac{y_1^2 \sin^2 \alpha}{2r_0^2} \right\} \\
 &= r_0 \left\{ 1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{x_1^2 + y_1^2 \cos^2 \alpha + u^2 + v^2 - 2(x_1 u + r_0 y_1 \sin \alpha + y_1 v \cos \alpha)}{r_0^2} \right\} , \tag{2.13}
 \end{aligned}$$

と変形される． x_1 を x ， y_1 を y として(2.13)式を(2.8)式に代入し，CGH 面上で光が入射した領域での積分を考えると， P_2 点での光波は次式のように表される．

$$U(u, v) = \frac{i}{2\lambda} \iint W(x, y) \left(\frac{\exp(-ikr_0)}{r_p} \right) \cdot \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2 \cos^2 \alpha}{2r_0}\right) \cdot \exp\left(-ik \frac{u_2 + v_2}{2r_0}\right) \\ \times \exp\left(ik \frac{xu + r_0 y \sin \alpha + yv \cos \alpha}{r_0}\right) \left(\cos \theta - \frac{\partial r_p}{\partial z}\right) dx dy \quad . \quad (2.14)$$

ただし、 $U(P_2)$ を $U(u, v)$ と書き変えた。

ここで、(2.1)式を(2.2)式に代入して整理すると、次式のように表される。

$$W(x_1, y_1) = F(x_1, y_1) A_0(x_1, y_1, 0) \exp[-2\pi i y_1 \cdot \sin \theta / \lambda] \quad . \quad (2.15)$$

x_1 を x , y_1 を y と書き換え、(2.15)式を(2.14)式に代入して整理し、また $1/r_p \doteq 1/r_0$ として積分に無関係とすると、次式が得られる。

$$U(u, v) = \frac{i}{2\lambda} \left(\frac{\exp(-ikr_0)}{r_0} \right) \\ \times \iint F(x, y) A_0(x, y, 0) \cdot \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2 \cos^2 \alpha}{2r_0}\right) \cdot \exp\left(-ik \frac{u_2 + v_2}{2r_0}\right) \\ \times \exp\left(ik \frac{xu + y(r_0 \sin \alpha + v \cos \alpha - r_0 \sin \theta)}{r_0}\right) \left(\cos \theta - \frac{\partial r_p}{\partial z}\right) dx dy \quad . \quad (2.16)$$

次に、 $\cos \theta - \frac{\partial r_p}{\partial z}$ について考える。(2.9)式から、次式が成り立つ。

$$\frac{\partial r_p}{\partial z} = \frac{z_2}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + z_2^2}} = \frac{z_2}{r_p} \quad . \quad (2.17)$$

ここで、(2.10)式と(2.13)式を(2.17)式に代入すると、次式が得られる。

$$\frac{\partial r_p}{\partial z} = \frac{r_0 \cos \alpha - v \sin \alpha}{r_0 + \frac{x_1^2 + y_1^2 \cos^2 \alpha + u^2 + v^2 - 2(x_1 u + r_0 y_1 \sin \alpha + y_1 v \cos \alpha)}{2r_0}} \\ = \frac{2r_0(r_0 \cos \alpha - v \sin \alpha)}{2r_0^2 + x_1^2 + y_1^2 \cos^2 \alpha + u^2 + v^2 - 2(x_1 u + r_0 y_1 \sin \alpha + y_1 v \cos \alpha)} \quad . \quad (2.18)$$

ここで、 $r_0 \gg x_1, y_1, u, v$ なので、分母および分子の2項目以降を無視すると、

$$\frac{\partial r_p}{\partial z} = \cos \alpha \quad , \quad (2.19)$$

が成り立つ。(2.19)式を(2.16)式に代入すると、(2.16)式は次のように変形される。

$$\begin{aligned}
U(u, v) &= \frac{i}{2\lambda} \left(\frac{\exp(-ikr_0)}{r_0} \right) \\
&\times \iint F(x, y) A_0(x, y, 0) \cdot \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2 \cos^2 \alpha}{2r_0}\right) \cdot \exp\left(-ik \frac{u_2 + v_2}{2r_0}\right) \\
&\times \exp\left(ik \frac{xu + y(r_0 \sin \alpha + v \cos \alpha - r_0 \sin \theta)}{r_0}\right) (\cos \theta - \cos \alpha) dx dy \quad . \quad (2.20)
\end{aligned}$$

ここで, f_u, f_v を次式で定義する.

$$f_u = ku/r_0, f_v = k(r_0 \sin \alpha + v \cos \alpha - r_0 \sin \theta)/r_0 \quad . \quad (2.21)$$

また, $W(x, y)$ を次式のように定義する.

$$W(x, y) = F(x, y) A_0(x, y, 0) \exp\left(-ik \frac{x^2 + y^2 \cos^2 \alpha}{2r_0}\right) \quad . \quad (2.22)$$

(2.21)式, (2.22)式を(2.20)式に代入して書き直すと次式のように変形される.

$$\begin{aligned}
U(u, v) &= \frac{i}{2\lambda} \left(\frac{\exp(-ikr_0)}{r_0} \right) (\cos \theta - \cos \alpha) \exp\left(-ik \frac{u_2 + v_2}{2r_0}\right) \\
&\times \iint W(x, y) \exp\{i(f_u x + f_v y)\} dx dy \quad . \quad (2.23)
\end{aligned}$$

以上より, 観測面上の点 P_2 における光波振幅 $U(u, v)$ を表す式が求められた. (2.23)式から $U(u, v)$ と $W(x, y)$ はフーリエ変換の関係にあることがわかる. この $W(x, y)$ 中の $F(x, y)$ が CGH パターンを表している. CGH パターンの設計では, 観測面上の目標とする強度分布から観測面上の光波の振幅分布 $U(u, v)$ を与え, 既知の入射光強度分布から CGH 面上の光波の振幅分布 $A_0(x, y, 0)$ を与える. これらの $U(u, v)$ と $A_0(x, y, 0)$ から(2.22)式および(2.23)式を用いて CGH パターン $F(x, y)$ を求める.

2.3 CGH 反射後の光路にレンズを挿入した場合の観測面の光波

本研究では, CGH の基板を放物面鏡とした. ここでは CGH とレンズを組み合わせたモデルを考え, レンズと CGH 間の距離をゼロとすることで CGH パターンの設計を行った.

図 2.5 に示すように, 前節で検討した観測面の位置に集光用のレンズを設置し, レンズの後ろに観測面を設置した場合を考える. CGH 面での座標を (x_1, y_1) , レンズ面での座標を (u, v) , 観測面での座標を (x_2, y_2) とする. CGH で反射した後, レンズに入射する直前の光波を $U_1(u, v)$, レンズ透過直後の光波を $U_1'(u, v)$, 観測面上での光波を $U_2(x_2, y_2)$ とする. レンズの焦点距離を f , CGH の中心からレンズまでの距離を r_0 , レンズから観測面までの距離を r_1 とする. ただし, レンズの厚みは無視した.

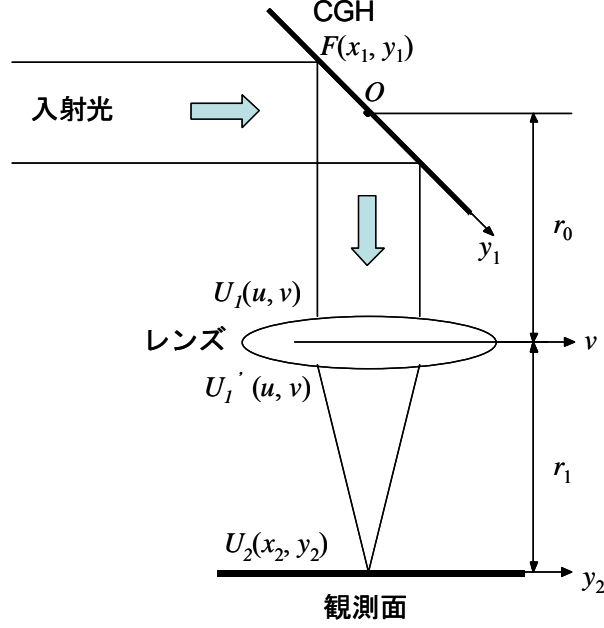


図 2.5 レンズを組み込んだ場合の計算モデル

レンズが光波に及ぼす位相の変化 $P(u, v)$ は,

$$P(u, v) = \exp\left(ik \frac{u^2 + v^2}{2f}\right), \quad (2.24)$$

と表すことができる. (2.24)式を用いると, $U_1'(u, v)$ は次式で表すことができる.

$$U_1'(u, v) = U_1(u, v)P(u, v), \quad (2.25)$$

また, $U_2(x_2, y_2)$ は,

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{i}{\lambda} \left(\frac{\exp(-ikr_1)}{r_1} \right) \iint U_1'(u, v) \exp\left(-ik \frac{(x_2 - u)^2 + (y_2 - v)^2}{2r_1}\right) dudv, \quad (2.26)$$

と表すことができる[46]. (2.24)式, (2.25)式を(2.26)式に代入すると次式が得られる.

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{i}{\lambda} \left(\frac{\exp(-ikr_1)}{r_1} \right) \iint U_1(u, v) \exp\left(ik \frac{u^2 + v^2}{2f}\right) \exp\left(-ik \frac{x_2^2 + y_2^2}{2r_1}\right) \\ \times \exp\left(-ik \frac{u^2 + v^2}{2r_1}\right) \exp\left(ik \frac{x_2 u + y_2 v}{r_1}\right) dudv. \quad (2.27)$$

(2.27)式を整理すると, 次式のように表される.

$$\begin{aligned}
U_2(x_2, y_2) &= \frac{i}{\lambda r_1} \exp\left\{-ik\left(r_1 + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2r_1}\right)\right\} \\
&\times \iint U_1(u, v) \exp\left\{ik \frac{u^2 + v^2}{2} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{r_1}\right)\right\} \exp\left(ik \frac{x_2 u + y_2 v}{r_1}\right) dudv \quad . \quad (2.28)
\end{aligned}$$

$U_1(u, v)$ に(2.23)式の $U(u, v)$ を代入すると、以下のように表される。

$$\begin{aligned}
U_2(x_2, y_2) &= \frac{-1}{2\lambda^2 r_0 r_1} (\cos\theta - \cos\alpha) \exp\left\{-ik\left(r_0 + r_1 + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2r_1}\right)\right\} \\
&\times \iiint W'(x_1, y_1) \exp\{i(f_u x_1 + f_v y_1)\} dx_1 dy_1 \\
&\times \exp\left\{ik \frac{u^2 + v^2}{2} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}\right)\right\} \exp\left(ik \frac{x_2 u + y_2 v}{r_1}\right) dudv \quad . \quad (2.29)
\end{aligned}$$

積分の順序を入れ替えると、次式のように書き直される。

$$\begin{aligned}
U_2(x_2, y_2) &= \frac{-1}{2\lambda^2 r_0 r_1} (\cos\theta - \cos\alpha) \exp\left\{-ik\left(r_0 + r_1 + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2r_1}\right)\right\} \\
&\times \iint W'(x_1, y_1) \iint \exp\left\{ik \frac{u^2 + v^2}{2} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}\right)\right\} \exp\left(ik \frac{x_2 u + y_2 v}{r_1}\right) \\
&\times \exp\{i(f_u x_1 + f_v y_1)\} dudv dx_1 dy_1 \quad . \quad (2.30)
\end{aligned}$$

ここで、 u, v に関する積分結果を次式の通り $A(x_1, y_1, x_2, y_2)$ と定義する。

$$\begin{aligned}
&A(x_1, y_1, x_2, y_2) \\
&\equiv \iint \exp\left\{ik \frac{u^2 + v^2}{2} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}\right)\right\} \exp\left(ik \frac{x_2 u + y_2 v}{r_1}\right) \exp\{i(f_u x_1 + f_v y_1)\} dudv \quad . \quad (2.31)
\end{aligned}$$

(2.31)式に(2.21)式を代入し、次式のように書き直す。

$$\begin{aligned}
A(x_1, y_1, x_2, y_2) &= \iint \exp\left\{ik \frac{u^2 + v^2}{2} \left(\frac{1}{f} - \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_0}\right)\right\} \\
&\times \exp\left[ik \left\langle \left(\frac{x_1}{r_0} + \frac{x_2}{r_1}\right)u + \left(\frac{y_1 \cos\alpha}{r_0} + \frac{y_2}{r_1}\right)v \right\rangle\right] dudv \cdot \exp\{iky_1(\sin\alpha - \sin\theta)\} \quad . \quad (2.32)
\end{aligned}$$

ここで観測面をレンズの焦点面とすると、

$$r_1 = f \quad . \quad (2.33)$$

が成り立つ． また， 次に示す(2.34)式を定義する．

$$X \equiv \frac{1}{\lambda} \left(\frac{x_1}{r_0} + \frac{x_2}{f} \right), \quad Y \equiv \frac{1}{\lambda} \left(\frac{y_1 \cos \alpha}{r_0} + \frac{y_2}{f} \right) \quad . \quad (2.34)$$

(2.33)式， (2.34)式を(2.32)式に代入すると次式のように変形される．

$$A(x_1, y_1, x_2, y_2) = \iint \exp \left\{ -ik \frac{u^2 + v^2}{2r_0} \right\} \exp \{ 2\pi i (Xu + Yv) \} dudv \cdot \exp \{iky_1 (\sin \alpha - \sin \theta) \} \quad . \quad (2.35)$$

ここで数学公式より， 次式が成り立つ．

$$\iint \exp \left(-2\pi i \frac{u^2 + v^2}{2a} \right) \exp \{ -2\pi i (xu + yv) \} dudv = -ia \cdot \exp \left\{ 2\pi ia \left(\frac{x^2 + y^2}{2} \right) \right\} \quad . \quad (2.36)$$

よって， (2.35)式は次のように変形される．

$$A(x_1, y_1, x_2, y_2) = -ikr_0 \cdot \exp \left\{ ik \frac{X^2 + Y^2}{2} \lambda^2 r_0 \right\} \exp \{iky_1 (\sin \alpha - \sin \theta) \} \quad . \quad (2.37)$$

(2.31)式， (2.33)式， (2.34)式および(2.37)式を用いて(2.30)式を整理すると次式が得られる．

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{iw}{2\lambda f r_0} (\cos \theta - \cos \alpha) \exp \left\{ -ik \left(r_0 + f + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2f} \right) \right\} \\ \times \iint W'(x_1, y_1) \exp \left[ik \frac{r_0}{2} \left\{ \left(\frac{x_1}{r_0} + \frac{x_2}{f} \right)^2 + \left(\frac{y_1 \cos \alpha}{r_0} + \frac{y_2}{f} \right)^2 \right\} \right] \\ \times \exp \{iky_1 (\sin \alpha - \sin \theta) \} dx_1 dy_1 \quad (2.38)$$

ここで， 次式が成り立つ．

$$\left(\frac{x_1}{r_0} + \frac{x_2}{f} \right)^2 + \left(\frac{y_1 \cos \alpha}{r_0} + \frac{y_2}{f} \right)^2 \\ = \frac{x_1^2 + y_1^2 \cos^2 \alpha}{r_0^2} + \frac{2x_1 x_2 + 2y_1 y_2 \cos \alpha}{r_0 f} + \frac{x_2^2 + y_2^2}{f^2} \quad , \quad (2.39)$$

(2.39)式を(2.38)式に代入して書き直すと次式のように表される．

$$\begin{aligned}
U_2(x_2, y_2) &= \frac{i}{2\lambda f} (\cos\theta - \cos\alpha) \exp\left\{-ik\left(r_0 + f + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2f}\right)\right\} \exp\left(ikr_0 \frac{x_2^2 + y_2^2}{2f^2}\right) \\
&\times \iint W'(x_1, y_1) \exp\left(ik \frac{x_1^2 + y_1^2 \cos^2\alpha}{2r_0}\right) \exp\left(ik \frac{x_1x_2 + y_1y_2 \cos\alpha}{f}\right) \\
&\times \exp\{iky_1(\sin\alpha - \sin\theta)\} dx_1 dy_1 \quad . \quad (2.40)
\end{aligned}$$

(2.40)式に(2.22)式を代入して整理すると次式が得られる．

$$\begin{aligned}
U_2(x_2, y_2) &= \frac{i}{2\lambda f} (\cos\theta - \cos\alpha) \exp\left[-ik\left\{r_0 + f + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2f}\left(1 - \frac{r_0}{f}\right)\right\}\right] \\
&\times \iint F(x_1, y_1) A_0(x_1, y_1, 0) \exp\left(ik \frac{x_1x_2 + y_1y_2 \cos\alpha}{f}\right) \exp\{iky_1(\sin\alpha - \sin\theta)\} dx_1 dy_1 \quad . \quad (2.41)
\end{aligned}$$

また， $\theta = \pi - \alpha$ とすると(2.41)式は次式のように変形される．

$$\begin{aligned}
U_2(x_2, y_2) &= -\frac{i \cdot \cos\alpha}{\lambda f} \exp\left[-ik\left\{r_0 + f + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2f}\left(1 - \frac{r_0}{f}\right)\right\}\right] \\
&\times \iint F(x_1, y_1) A_0(x_1, y_1, 0) \exp\left(ik \frac{x_1x_2 + y_1y_2 \cos\alpha}{f}\right) dx_1 dy_1 \quad . \quad (2.42)
\end{aligned}$$

(2.42)式より CGH の入射光波に対する作用を表す関数 $F(x_1, y_1)$ と CGH に入射する光波の CGH 面上での振幅 $A_0(x_1, y_1, 0)$ から観測面上の光波 $U_2(x_2, y_2)$ を求めることができる．また，観測面上の光強度分布は $|U_2(x_2, y_2)|^2$ で表すことができる．

2.4 反射型曲面 CGH の設計

反射型曲面 CGH の具体的な設計方法について述べる．反射型曲面 CGH を用いたレーザ加工の模式図は図 2.2 に示したとおりである．CGH に入射するレーザ光は平面波とし，CGH は放物面鏡を基板として入射光に対し 90° の角度で光を折り返す．レーザ光強度分布は放物面鏡の焦点位置で目標とする強度分布に整形される．

整形の目標とする強度分布は，レーザ表面処理に適用することを想定し，図 2.6 に示すように x_2 軸方向に幅 4mm で一様な分布， y_2 軸方向にはピーク強度の $1/e^2$ の幅が 1mm のガウス分布とした．この分布は矩形ガウス分布と呼ばれ，レーザを用いた表面処理に利用される[47]．この光強度分布は次式で表される．

$$I(x_2, y_2) = \begin{cases} 0 & (|x_{20}| > x_{20}) \\ C \exp\left\{-2\left(\frac{y_2}{y_{20}}\right)^2\right\} & (|x_{20}| \leq x_{20}) \end{cases} \quad . \quad (2.43)$$

ただし， $x_{20}=2\text{mm}$ ， $y_{20}=0.5\text{mm}$ ， C は任意の定数．また，添え字の 2 は放物面鏡の焦点面を表す．表面処理時には y_2 軸の方向にレーザ光を走査する．

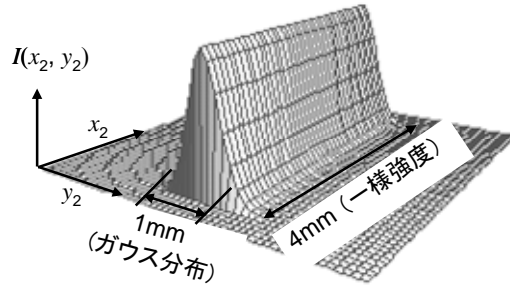


図 2.6 整形の目標とする強度分布

反射型曲面 CGH は表面の凹凸形状によって、反射光に位相分布を与える．凹凸形状の最小単位をピクセルと呼び、ピクセルごとに設計された高さを持っている．図 2.7 に CGH 表面凹凸形状の模式図を示す．ピクセルは 1 辺が d の長さをもつ正方形とし、CGH の凹凸形状のパターンはピクセル $N \times N$ 個で構成する．従って、CGH パターンは一辺が $D = N \times d$ の長さを持つ正方形になる．

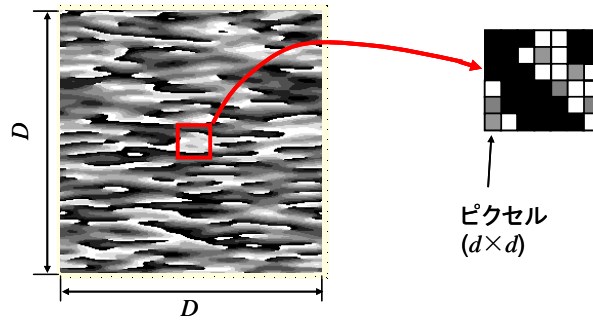


図 2.7 CGH 表面凹凸形状の模式図

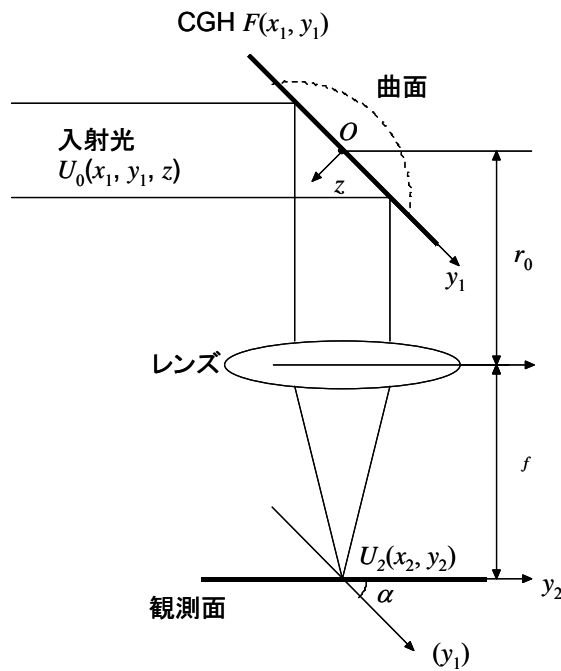


図 2.8 CGH 設計モデル

CGH 表面形状設計のためのモデルを図 2.8 に示す. 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, 実際の設計ではホログラムとレンズ中心間の距離 r_0 を 0 とした. r_0 を 0 とすることにより, 本モデルは曲面 CGH のモデルと等価になる. ここで, 各パラメータは,

- (x_1, y_1) : CGH 面内の座標,
- (x_2, y_2) : 観測面内の座標,
- z : CGH 面の法線方向の軸,
- $U_0(x_1, y_1, z)$: CGH に入射する光波,
- $U_2(x_2, y_2)$: 観測面上の光波,
- α : y_1 軸 (CGH 面) と y_2 軸 (観測面) のなす角 ($=45^\circ$),
- f : レンズの焦点距離,
- r_0 : レンズ中心と CGH 間の距離 ($=0$),
- k : レーザ光の波数 ($=2\pi/\lambda$),
- λ : レーザ光の波長 ($=10.6\mu\text{m}$),

である.

CGH の複素反射率を表す関数 $F(x_1, y_1)$ と観測面 (放物面鏡の焦点面) の光波 $U_2(x_2, y_2)$ の関係は(2.42)式で表される. ここで $r_0=0$ とした場合(2.42)式は次式のように書き直される.

$$U_2(x_2, y_2) = -\frac{i \cos \alpha}{\lambda f} \exp \left\{ -ik \left(f + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2f} \right) \right\} \\ \times \iint F(x_1, y_1) A_0(x_1, y_1, 0) \exp \left\{ ik \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2 \cos \alpha}{f} \right\} dx_1 dy_1 \quad (2.44)$$

(2.44)式から $F(x_1, y_1) A_0(x_1, y_1, 0)$ と $U_2(x_2, y_2)$ はフーリエ変換の関係にあることがわかる.

CGH の設計では, CGH 面上での入射光波の振幅 $A_0(x_1, y_1, 0)$ と観測面上の目標とする強度分布 $I_0(x_2, y_2)$ を与え, それを実現するための CGH の複素反射率を表す関数 $F(x_1, y_1)$ を決定する. 観測面上の光強度分布は $|U_2(x_2, y_2)|^2$ であらわされるため, $I_0(x_2, y_2)$ が与えられれば,

$$U_2(x_2, y_2) = \sqrt{I_0(x_2, y_2)} \quad (2.45)$$

から $U_2(x_2, y_2)$ の逆フーリエ変換から簡単に $F(x_1, y_1)$ が得られるように考えるかもしれない. しかし, ホログラムには吸収がないので, $|F(x_1, y_1)|=1$ の条件のもとで, 目標とする強度分布 $I_0(x_2, y_2)$ に近い強度分布 $|U_2(x_2, y_2)|^2$ が得られるように $F(x_1, y_1)$ の最適解を決定する必要がある. $U_2(x_2, y_2)$ の位相は観測面上の強度に無関係であるため, 自由に選択することができる. そこで CGH パターンの設計では, $|F(x_1, y_1)|=1$ を制約条件, $U_2(x_2, y_2)$ の位相を変数として, $F(x_1, y_1)$ の位相を最適化する.

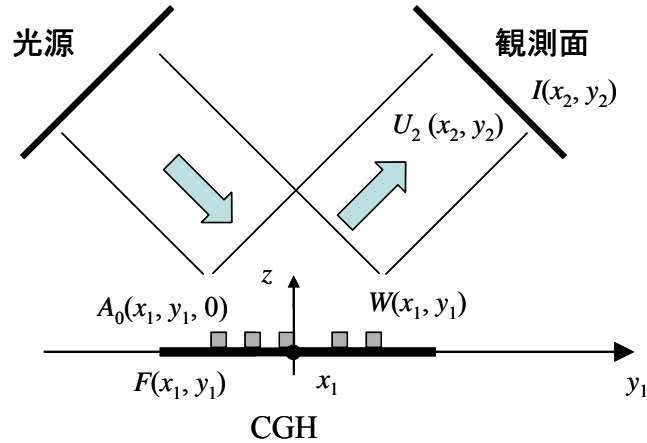
本研究では CGH パターンの最適化に GS 法[48]を用いた. GS 法はフーリエ変換に基づいた繰り返し計算を利用してパターンの最適化を行う方法である. GS 法を用いた CGH の設計方法のフローチャートを図 2.9 に示す. $W(x_1, y_1)$ は CGH 面で反射された直後の光波である. 最終的に得られた $W(x_1, y_1)$ から次式を用いて $F(x_1, y_1)$ を求める.

$$F(x_1, y_1) = \frac{W(x_1, y_1)}{A_0(x_1, y_1, 0)} \quad (2.46)$$

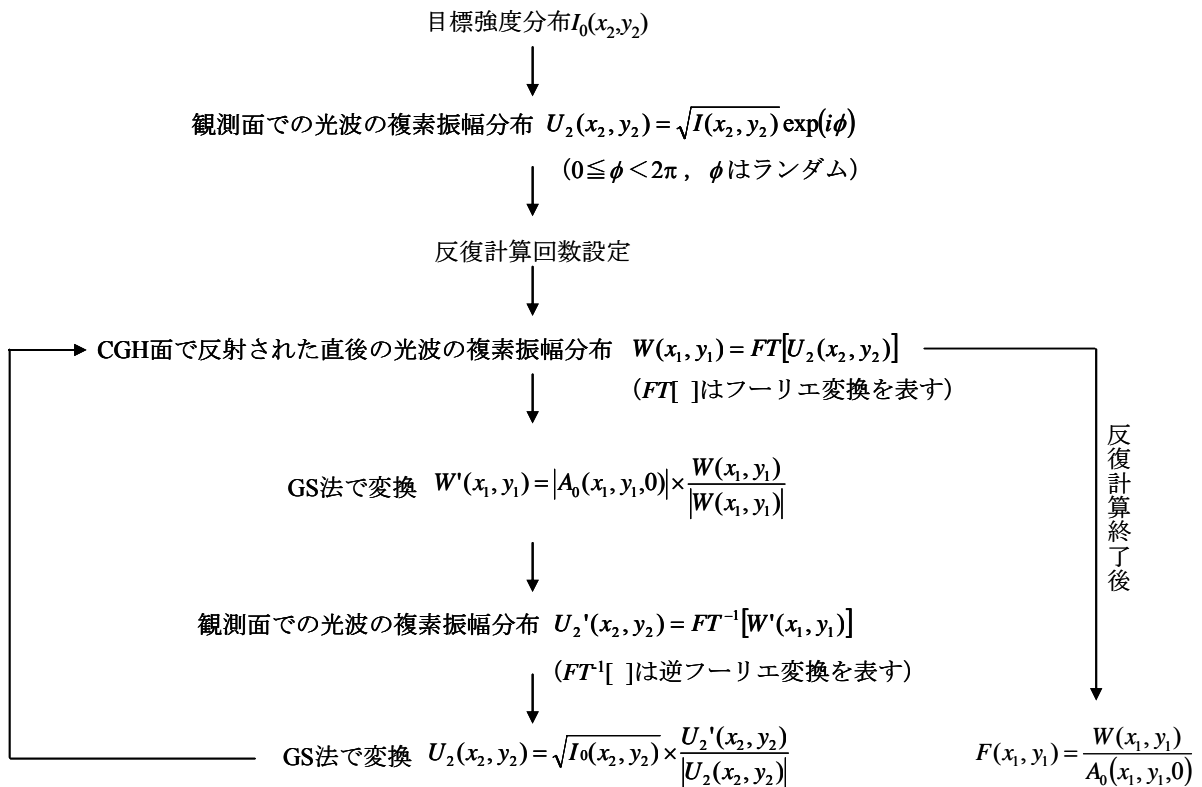
$F(x_1, y_1)$ と実際の素子表面の凹凸高さ分布 $h(x_1, y_1)$ との関係は,

$$F(x_1, y_1) = \exp\{ik2h(x_1, y_1)\cos\alpha\} \quad , \quad (2.47)$$

と表される. ただし, $0 \leq h(x_1, y_1)\cos\alpha \leq \lambda/2$ である. $F(x_1, y_1)$ と(2.47)式から CGH 面の凹凸高さ分布 $h(x_1, y_1)$ を求める.



(a) 反射型 CGH 模式図



(b) CGH 設計フローチャート

図 2.9 GS 法を用いた反射型 CGH 設計方法のフローチャートと模式図

GS 法による繰り返し計算の収束判定の評価関数には、次式で定義する強度分布の 2 乗平均誤差を用いた。

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{\sum \{I_0(x_2, y_2) - I(x_2, y_2)\}^2}{N_s}} \quad (2.48)$$

ただし、 $I_0(x_2, y_2)$ と $I(x_2, y_2)$ はそれぞれ観測面における目標強度分布と設計した CGH により整形された強度分布である。また、 N_s は強度を比較した点の数である。

次に具体的な CGH パターンの設計について述べる。CGH に入射するレーザー光は、炭酸ガスレーザー加工機に搭載することを想定して、ビーム径 $\phi 14\text{mm}$ （ピーク強度の $1/e^2$ の径）のガウス分布とした。レーザー光が放物面鏡に 45° の角度で入射するため、 $\phi 14\text{mm}$ の入射ビームは CGH 面上では長径 19.8mm 、短径 14mm の楕円形となる。よって CGH の一辺の長さ D は 20mm 以上必要である。

CGH パターンを設計した結果の一例を図 2.10 に示す。図 2.10(a)は設計したパターン、図 2.10(b)はその CGH を用いた場合の整形された強度分布である。ピクセル数は 128×128 、ピクセルサイズは $160\mu\text{m} \times 160\mu\text{m}$ である。この場合、CGH パターンの大きさは $20.48\text{mm} \times 20.48\text{mm}$ である。また、反復計算の回数は 200 回とした。図 2.10 では $h(x_1, y_1)$ は連続値になっており、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、 $7.5\mu\text{m}$ を表している。この段差 $7.5\mu\text{m}$ は、CGH 表面凹凸形状の底 ($0\mu\text{m}$) で反射した光と最も高い位置 ($7.5\mu\text{m}$) で反射した光の間の位相差が 2π になる段差である。図 2.10(b)からレーザー光強度分布は図 2.6 の目標とする強度分布に近い強度分布に整形できている。

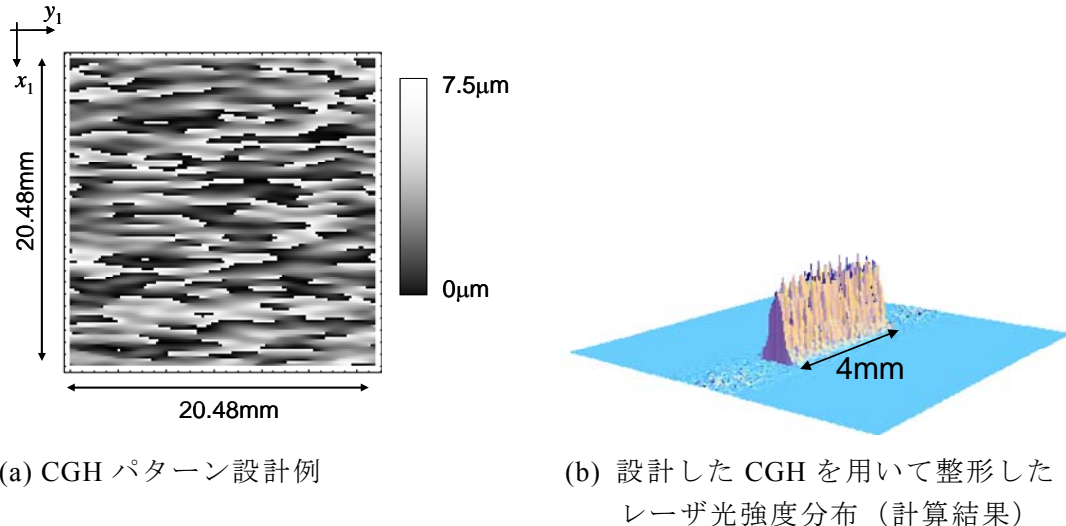


図 2.10 CGH パターンの設計例と設計した CGH を用いて整形したレーザー光強度分布の計算結果

次に CGH のピクセル数とピクセルサイズの最適値を決めるために、ピクセル数を変えて CGH パターンの設計を行った。ここでは繰り返し計算のたびに平均誤差 σ_I を計算し、 σ_I の値が大きくなった時点で計算を終了させた。ピクセル数と σ_I の最終値の関係を表 2.1 に示す。また、設計した CGH を用いて整形したレーザー光強度分布を計算した結果を図 2.11 に示す。ピクセル数の違いによる誤差の違いはあまり大きくなかった。レーザー光強度分布次に CGH のピクセル数とピクセルサイズの最適値を決めるために、ピクセル数を変えて

CGH パターンの設計を行った．ここでは繰り返し計算のたびに平均誤差 σ_I を計算し， σ_I の値が大きくなった時点で計算を終了させた．ピクセル数と σ_I の最終値の関係を表 2.1 に示す．また，設計した CGH を用いて整形したレーザ光強度分布を計算した結果を図 2.11 に示す．ピクセル数の違いによる誤差の違いはあまり大きくなかった．レーザ光強度分布の整形結果についても，ピクセル数が 256×256 以上であれば，違いはみられなかった．よって，ピクセル数（ピクセルサイズ）は 256×256 ピクセル($d=80\mu\text{m}$)とした．この条件で設計した CGH の凹凸パターン $h(x_1, y_1)$ を図 2.12 に示す．

表 2.1 ピクセル数と平均誤差の関係

ピクセル数 (ピクセルサイズ)	平均誤差 σ_I
128×128 ($160\mu\text{m} \times 160\mu\text{m}$)	0.0175
256×256 ($80\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$)	0.0164
512×512 ($40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$)	0.0171

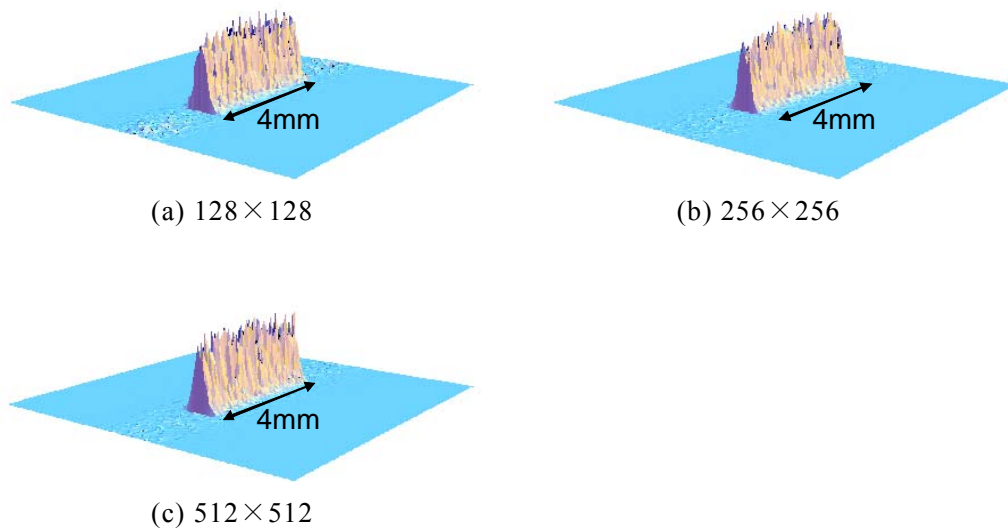


図 2.11 異なるピクセル数で設計した CGH による整形したレーザ光強度分布の計算結果

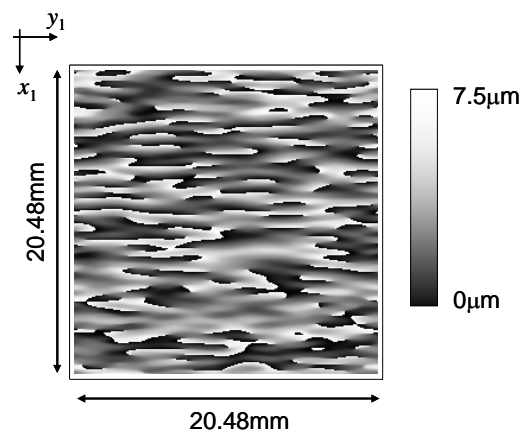
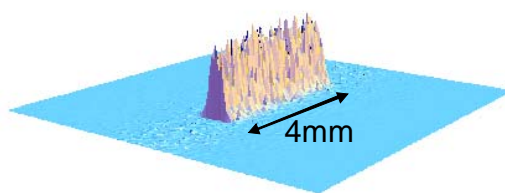
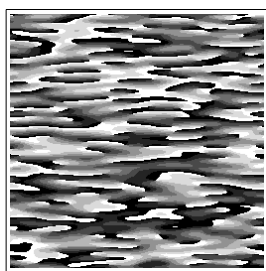


図 2.12 CGH パターン ($h(x_1, y_1)$) の設計値 (ピクセル数 256×256)

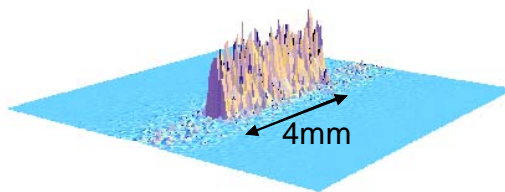
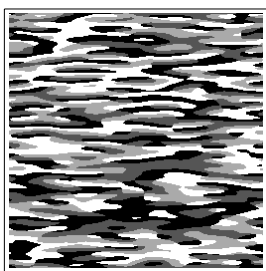
ホログラムを実際に製作する場合，連続的な高さ変化を持つ素子を製作するのは容易でない．そのため，CGHの形状は，ある高さごとに区切って，数段のレベルに量子化される．このレベル分けした数（レベル数）と平均誤差の関係をシミュレーションにより調べた結果を表 2.2 に示す．また，各レベル数での CGH パターンと整形された強度分布を図 2.13 に示す．レベル分けを粗くするにつれて誤差が大きくなり，強度分布も乱れていく．しかし，レーザで表面処理を行う場合，処理は熱伝導により行われるため，バイナリー（2 レベル）の場合の強度分布でも，ある程度の表面処理は可能だと考えられる．よって，本研究では図 2.13(c)に示すパターンのバイナリー形状の素子を製作することとした．

表 2.2 レベル数と平均誤差の関係

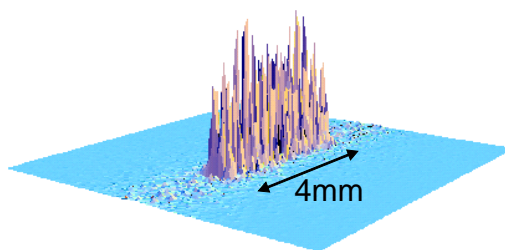
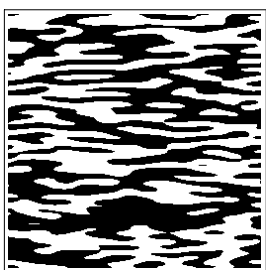
レベル数	平均誤差 σ_I
8	0.0197
4	0.0357
2	0.0855



(a) 8 レベル



(b) 4 レベル



(c) 2 レベル（バイナリー）

図 2.13 設計した CGH パターンと整形された強度分布
ピクセル数 256×256 , ($d=80\mu\text{m}$)

2.5 反射型曲面バイナリーCGHの製作

製作する反射型曲面バイナリーCGHの断面構造を図2.14に示す。基板はレーザ光を集光するための銅の放物面鏡とし、その上に厚さ $0.2\mu\text{m}$ のパラジウムの薄膜層、CGHのパターニングが施された厚さ $3.75\mu\text{m}$ の銅めっき層、および厚さ 50nm の金コーティング層で構成されている。銅めっき層の厚さはCGHの凹凸の底と最も高い位置でそれぞれ反射した光の位相差が π になる大きさである。金コーティング層はレーザ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エッチングストップ層であり、詳細は後に述べる。

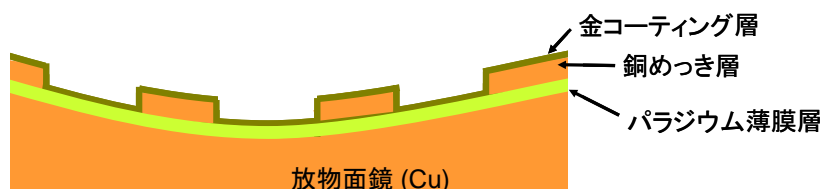


図 2.14 反射型バイナリーCGHの断面形状

CGHの製作工程を図2.15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（豊田工機，AHN60-3D）を用いて厚さ約 5mm の放物面鏡を製作した。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 $0.02\mu\text{mRa}$ [49]に比べて十分小さい。

放物面鏡基板の上に真空蒸着により厚さ $0.2\mu\text{m}$ のパラジウム層をコートした後、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（クラリアントジャパン社，AZ1500）を塗布し、CGHパターンの描画を行った。フォトレジストにパターンを形成する場合、基板が曲面であるため、一般的なフォトリソグラフィで用いられるマスク露光によるパターンの形成を行うことができない。ここではレーザ描画装置を改良して曲面上へのCGHパターンの描画ができるようにした。改良は、レーザ描画装置にZ軸方向のステージとサーボ機構を追加し、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。詳細は後に述べる。

レーザ描画を行った後、フォトレジストを現像し、 FeCl_2 溶液（ 0.85% ）を使って銅めっき層を化学的にエッチングしてCGHの凹凸パターンを形成した。通常、金属を薬品で化学的にエッチングする場合、金属の結晶粒内よりも粒界の方がエッチングされやすいため、エッチング後の表面には結晶粒の凹凸が現れる。JIS（JIS H 3100）によると、銅の結晶粒径は $15\sim 120\mu\text{m}$ 程度であり、銅基板を直接エッチングする方法では鏡面を保つことができない。本研究では、 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、良好な状態が保たれる。エッチングストップ層にパラジウムを選択した理由は、 FeCl_2 溶液に耐性があることのほか、銅との密着性がよいことが挙げられる。最後に表面に金薄膜を 50nm の厚さでコーティングした。

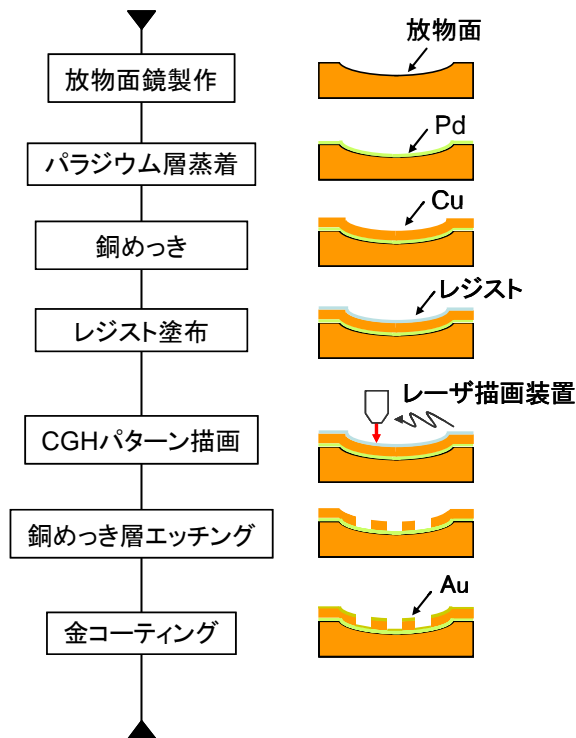


図 2.15 反射型曲面バイナリーCGH の製作工程

レーザー描画にはネオアーク社製の DDB-3TH を用いた。光源は He-Cd レーザ (波長 442nm) で、描画部でのレーザー強度は約 $45\mu\text{W}$ である。一般にレーザー描画装置には、線幅を一定にするために、オートフォーカス機能がついている。ここで用いたレーザー描画装置のオートフォーカスの動作範囲は $\pm 10\mu\text{m}$ である。一方、CGH の基板となる放物面鏡の焦点距離は 127mm とした。この場合、放物面鏡の最も深い位置と最も高い位置の Z 方向の差は約 0.4mm である。放物面鏡の断面形状模式図を図 2.16 に示す。高さの差 0.4mm はレーザー描画装置のオートフォーカスの動作範囲 ($\pm 10\mu\text{m}$) を超えているため、本研究ではレーザー描画装置に Z 軸ステージとサーボ機構を追加し、0.4mm の範囲のオートフォーカスが可能になるように改造した。改良したレーザー描画装置の写真と装置の模式図を図 2.17 に示す。追加した Z 軸ステージ (中央精機社, ALV-901-HP) の動作範囲は $\pm 10\text{mm}$ である。新たに追加した Z 軸ステージの制御には、レーザー描画装置のフォーカスエラー信号を利用した。

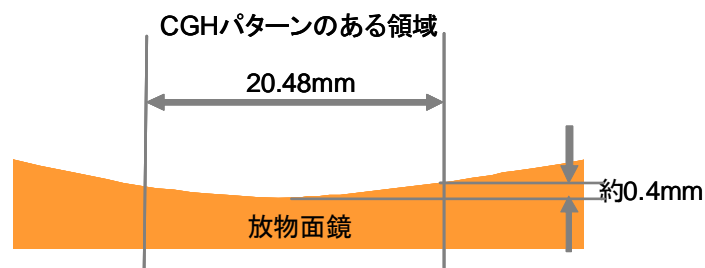
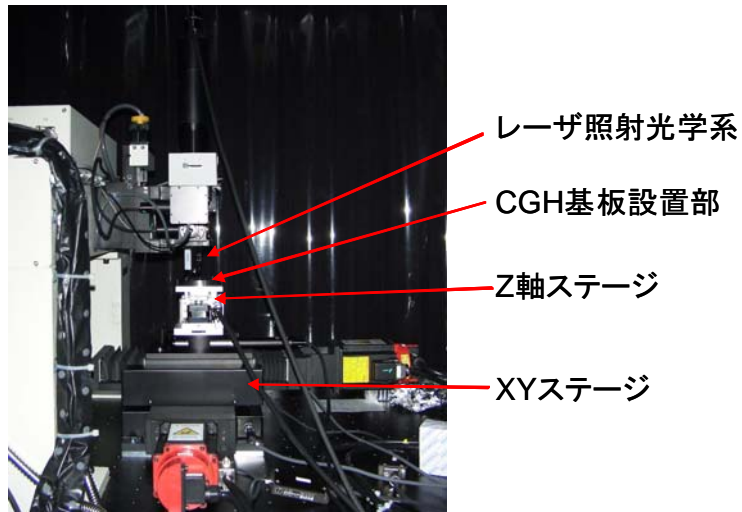
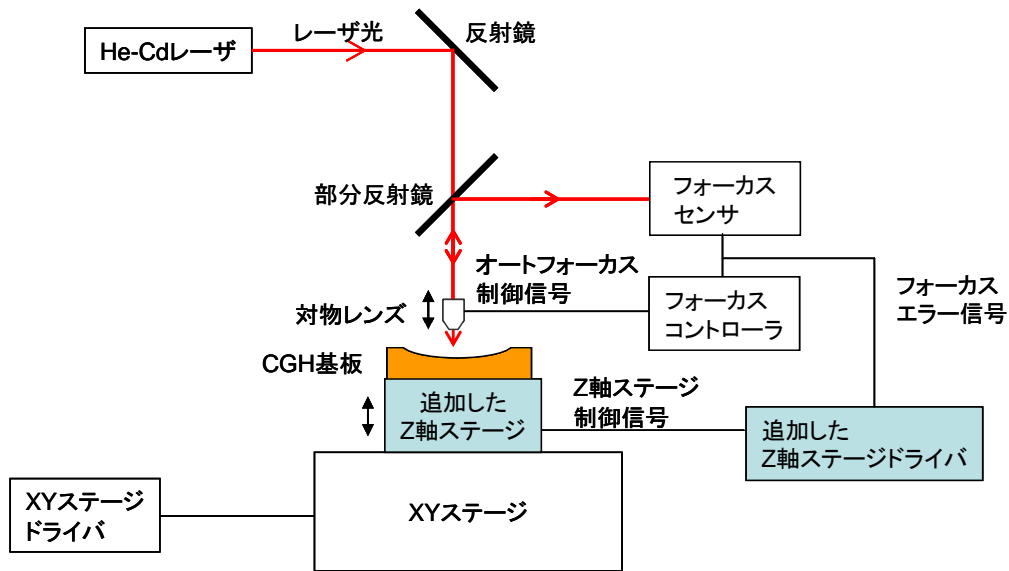


図 2.16 放物面鏡の断面形状模式図



(a) レーザ描画装置写真



(b) レーザ描画装置の制御系模式図

図 2.17 改造したレーザ描画装置の写真と装置模式図

改造したレーザ描画装置の動作確認のために、レーザ描画のステージ上に厚さ 0.5mm のシリコン基板を設置して、Z 軸ステージの応答を測定した結果を図 2.18 に示す。図 2.18 はフォーカスエラー信号を測定した結果であり、縦軸がフォーカスエラー信号、横軸が時間である。測定はレーザ描画装置のオートフォーカス機能のみを用いた場合 (AF のみ) と新たに追加した Z 軸ステージ制御のみ (フォーカスエラー信号を一定にするように制御、AF 機能は OFF)、Z 軸ステージ制御にオートフォーカス機能を組み合わせた (Z 軸+AF) 場合の 3 条件で行った。

段差位置でフォーカスがずれ、フォーカスエラー信号が大きくなっている。フォーカスエラー信号は速やかに元の大きさに修正される必要があるが、Z 軸+AF の場合が最も制御速度が速く、約 1.8 秒でエラー信号を元の値に制御することができている。一方、AF のみの場合はフォーカス信号が元の値に戻らず、フォーカスを合わせる事ができていない。

実際に必要とされる応答速度は、レーザ描画速度 0.5mm/s で放物面鏡の形状に追従でき

る速度である．CGH パターンの大きさは約 20mm×20mm であるため，CGH パターン中心から端の位置まで（長さ 10mm）描画するのにかかる時間は 20 秒である．放物面鏡の最も低い位置と最も高い位置の Z 方向の差は約 0.4mm であり，20 秒で 0.4mm の Z 方向の高低差に対応するためには，約 20 μ m/s の応答速度が必要である．今回改造したレーザ描画装置の場合，1.8 秒で 0.5mm の段差に対応していることから応答速度 280 μ m/s であり，十分な応答速度を有している．

実際の素子の製作では，改造したレーザ描画装置でオートフォーカスと Z 軸制御を組み合わせ合わせてレーザ描画を行った．なお，CGH パターンの総描画時間は約 48 時間であった．

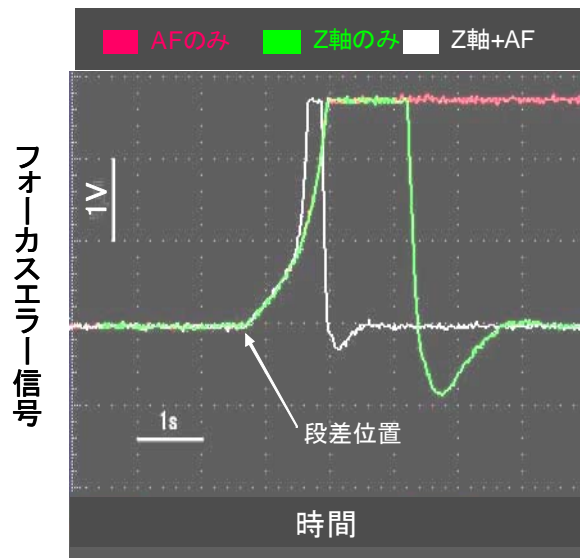


図 2.18 フォーカスエラー信号測定結果

製作した CGH を図 2.19 に示す．中央に CGH の凹凸パターンが形成されている．また，CGH の表面形状の測定例を図 2.20 に示す．測定には 3 次元表面構造解析顕微鏡 (Zygo 社，New View 5020) を用いた．表面形状を数点測定した結果，CGH の凹凸段差は 3.1～3.9 μ 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，CGH 面内の形状については，凸部分の側面が平均 10 μ m 程度小さくなっていた．レーザ描画装置によるレジストパターンの製作精度が 1 μ m 以下であるため，この 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 0.04～0.22 μ mRa，エッチングされた面（パラジウム面）では 0.04 μ mRa 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 μ mRa より悪くなっているが，エッチングストップ層を利用しない場合の面粗さ 0.2～0.5 μ mRa 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 μ mRa 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．

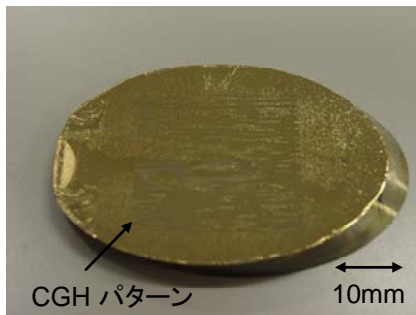


図 2.19 製作した CGH

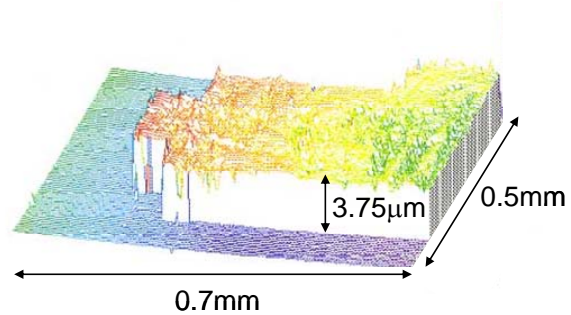


図 2.20 CGH 表面形状の測定例

2.6 反射型バイナリCGH を用いたレーザ光強度分布整形実験

製作した反射型バイナリCGH の光学的性能を評価するために、レーザ光強度分布整形実験を行った。実験装置の模式図を図 2.21 に示す。光源には取り扱いが容易な出力 10W の炭酸ガスレーザ（SYNRAD 社 48-1W）を用いた。エキスパンダによりφ14mm に広げたレーザ光を曲面上 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ーにより、光強度を約 1/40,000 に減光している。

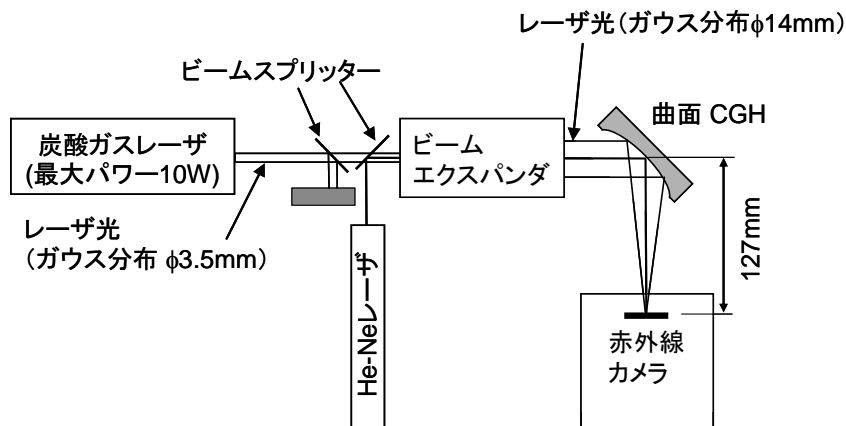


図 2.21 反射型バイナリCGH を用いたレーザ光強度分布整形実験の模式図

実験で得られた赤外線カメラ画像とその強度分布を図 2.22 に示す。この強度分布はバックグラウンドの影響を除くために、回折像の測定画像からレーザ光のない（回折像測定時と同じ状態でレーザ光をオフにしている）場合の測定画像を引いたものである。回折像の大きさは 1mm×4mm 程度であり、ほぼ設計通りであった。また、回折像 1mm×4mm 内の強度和と測定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。一方、図 2.11(b)に示すシミュレーション結果では 73.2%であり、実験では効率が 7.5%低かった。実験での効率が低かった原因については CGH の製作誤差や実験時の CGH 設置誤差などの原因が考えられる。

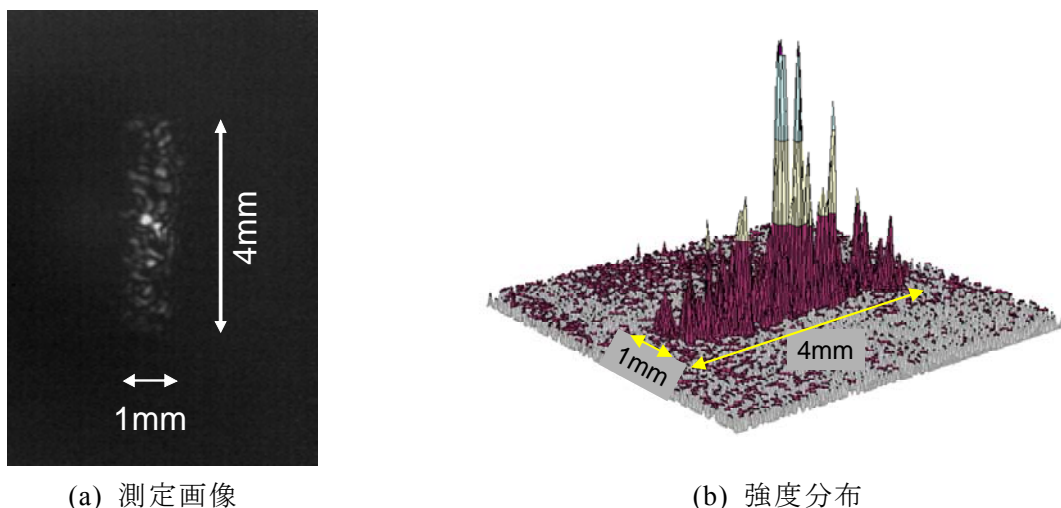


図 2.22 回折像の測定結果

図 2.22 に示す強度分布には多数の針状のノイズが見られる．また，中心の 0 次光が非常に強く，0 次光強度は $1\text{mm} \times 4\text{mm}$ 内の平均強度の 4~5 倍である．針状のノイズは図 2.13(c) からバイナリ CGH の場合に発生するものであり，レベル数を大きくすることにより改善できる．

一方，0 次光の要因についてシミュレーションにより検討を行った．回折像の強度分布に影響を与える因子として CGH の製作誤差と設置誤差が考えられる．ここで CGH の設置誤差については，全ての実験において同様の 0 次光が観察されたため，0 次光発生原因の可能性は低い．CGH の製作誤差として，CGH 凹凸形状の段差を変えて回折像の強度分布を計算した．計算結果の一例を図 2.23 に示す．これは設計値 $3.75\mu\text{m}$ の段差に 10% の製作誤差を加えた，段差 $4.125\mu\text{m}$ (3.75×1.1) の場合であり，図 2.22 の実験結果と同じように回折像の中心位置（0 次光が発生する位置）の強度が強くなっている．CGH の凹凸形状の段差と回折像中心位置の強度との関係を計算した結果を図 2.24 に示す．縦軸は回折像中心位置における強度の計算値と設計値との比である．図から，段差の製作ずれが $\pm 0.4\mu\text{m}$ あった場合，強度比は約 4 倍になっている．前節で述べたとおり，CGH の凹凸高さは $3.1 \sim 3.9\mu\text{m}$ の間でばらついており，シミュレーション結果とよく一致している．従って，0 次光の発生要因は CGH の凹凸段差の製作ずれであり，レベル数を大きくすること，および凹凸形状の段差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．

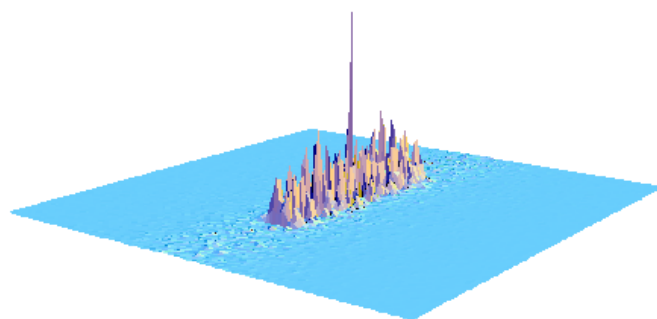


図 2.23 CGH 凹凸段差の製作ずれを考慮したレーザ光強度分布の計算例
(段差の製作ずれ 10%)

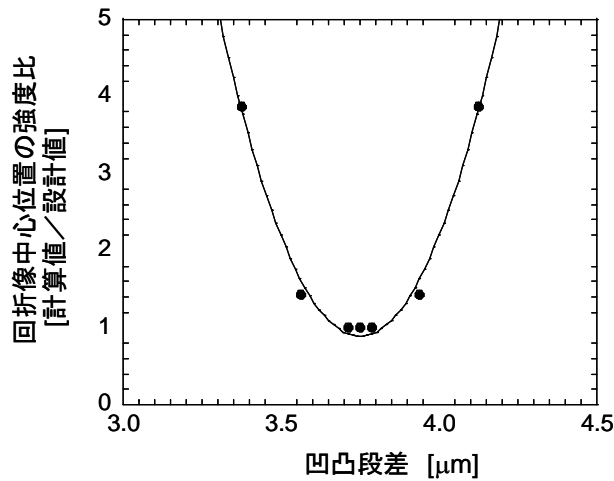


図 2.24 CGH 凹凸段差と 0 次光強度の関係

整形したレーザー光をアクリル板に約 1 秒照射した結果を図 2.25 に示す. 約 1mm×4mm の大きさのバーンパターンが得られた. ただし, パターンの深さは一様でなく, 図 2.22 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.

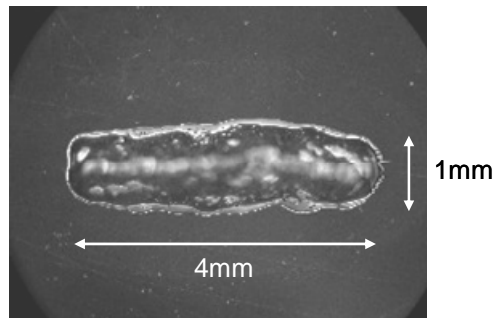


図 2.25 アクリル板に整形したレーザー光を照射した結果

2.7 まとめ

本章では, 炭酸ガスレーザー光の強度分布を整形する反射型曲面バイナリーCGH の設計, 製作手法について述べた. CGH の製作では, パラジウムをエッチングストップ層とした薬品を用いたエッチング手法を利用した. 曲面上への CGH パターン描画のために, 曲面形状に追従して描画できるようにレーザー描画装置を改造し, 0.4mm の深さを持つ曲面上に描画を行った.

製作した CGH による強度分布整形実験を行った結果, 円状でガウス分布のレーザー光を大きさ 1mm×4mm の矩形形状に整形することができた. しかし得られた強度分布には多数の針状ノイズが含まれ, また強い 0 次光が見られた. 針状のノイズは CGH をマルチレベル化することによって改善することができる. 強い 0 次光については, CGH の凹凸高さの製作精度を向上させることにより, 改善することができる.

第3章 反射型平面マルチレベル CGH

第2章では、銅の放物面鏡上にバイナリーの微細な凹凸形状を持つ曲面バイナリーCGHを製作し、炭酸ガスレーザー光の強度分布整形を行った。このCGHは、レーザー光を集光するための放物面鏡上にCGHパターンが形成されており、強度分布の整形とレーザー光集光の機能を併せ持っており、集光レンズが不要であった。

一方、この曲面バイナリーCGHは、表面の凹凸形状が2段階のバイナリー形状であったため、強度分布に多数の針状のノイズが含まれた。このノイズを低下させるためには、CGHを多段のマルチレベル形状にする必要がある。前章では、銅の放物面鏡上にパラジウムを蒸着し、その上にめっきにより銅の層を形成した基板に対し、薬品を使ったエッチングでパラジウム層が露出するまで銅めっき層を除去して、凹凸形状を製作した。この方法で多段形状を製作する場合、多数回のエッチングを繰り返すことで、深さ方向だけでなく横方向へのエッチングが進行し、正確な多段形状を得ることが困難である。また、高出力レーザーへの適用を考えた場合、多層で存在する銅とパラジウム間の密着性、熱膨張率の違いなども問題になる。

電気を通さないフォトレジストのパターンをマスクにして銅めっきを行うと、基板表面が露出している部分にだけ銅が堆積する。Ch.Hembd-Sollnerらは、この手法を用いて銅の平面基板上に銅を堆積させ、炭酸ガスレーザー用の回折格子(ピッチ $30\mu\text{m}$ 、凹凸高さ $4.5\mu\text{m}$)を製作している[42]。ここでは、このめっきプロセスを複数回繰り返すことで、銅の平板上にマルチレベルCGHを製作した。この手法を「マスクめっき法」と呼ぶ。マスクめっき法を利用することによりフォトレジストのパターンが正確に銅のパターンに写されるとともに、同種材料を堆積させるために異種金属間の密着問題が発生しない。

本章では、マスクめっき法を利用してマルチレベル形状を持つ銅の平面CGHを製作し、ノイズの少ない強度分布整形が可能なことを示す。また、製作したCGHを高出力炭酸ガスレーザー加工機に搭載し、高出力レーザーでもCGHが破損することなく適用できることを示す。さらに、平面マルチレベルCGHの応用として、マーキング用のCGHの開発に取り組んだ。このCGHの製作を通して、めっき層の凹凸高さの精度を向上させるためにめっきプロセスの改善を行ったので、その結果についても述べる。

3.1 反射型平面マルチレベルCGHの設計と製作

3.1.1 反射型平面マルチレベルCGHの設計

平面マルチレベルCGHの製作手法について述べる前に、目標とするレーザー光強度分布、およびCGHの設計とその結果について簡単に触れる。図3.1にCGHを用いた強度分布整形の基本構成を示す。平面CGHに 45° の角度で入射したレーザー光は反射の後、レンズにより集光され、レンズの焦点位置で目標とする強度分布になる。CGHに入射するレーザー光は、炭酸ガスレーザー加工機に搭載することを想定して、波長 $10.6\mu\text{m}$ 、ビーム径(ピーク強度の $1/e^2$ の径) $\phi 14\text{mm}$ のガウス分布とした。

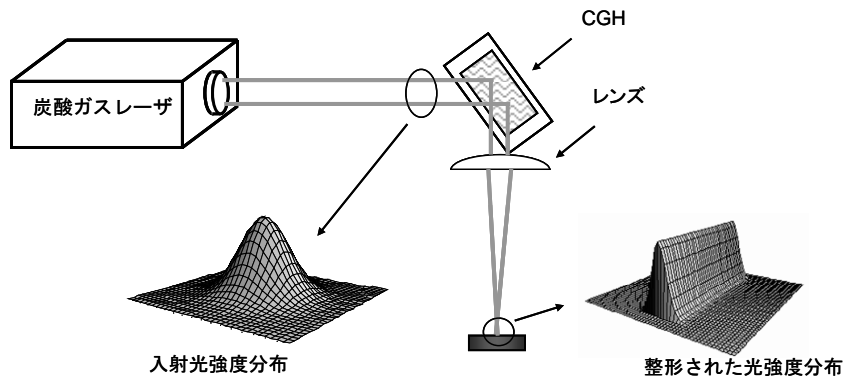


図 3.1 反射型平面マルチレベル CGH を用いた強度分布整形の模式図

目標とするレーザ光強度分布は、前章と同じく、レーザ表面処理に適用することを想定して、(2.43)式に示した x_2 軸方向に幅 4mm で一様な分布、 y_2 軸方向にはピーク強度の $1/e^2$ の幅が 1mm のガウス分布とした。

CGH のパターン（表面の凹凸形状）は、一辺が $80\mu\text{m}$ の正方形を 1 ピクセルとして、 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。CGH で反射された直後の光波とレンズ焦点位置での光波はフーリエ変換の関係にある。ここでは、前章と同じように GS 法[48]を用いた。GS 法で得られるのは 0 から 2π の間の連続した CGH の位相分布である。本章では、位相分布を一定の間隔で 8 段階に離散化し、8 レベルの CGH を設計した。

設計した CGH の表面凹凸形状パターンを図 3.2 に示す。図は、高さ分布を白黒の濃淡で表しており、白い領域が最も高く $6.56\mu\text{m}$ である。また、各段の段差は $0.94\mu\text{m}$ である。このマルチレベル CGH を用いて得られる回折像の強度分布の計算結果を図 3.3 に示す。図 2.6 に示した目標とする強度分布に近い分布が得られているが、多少ノイズが発生している。また、目標とする分布は x 軸方向に一様な分布であるが、図 3.3 では $-27\% \sim +12\%$ の範囲でばらついている。

入射光強度に対する回折像 $1\text{mm} \times 4\text{mm}$ 内の強度割合を回折効率と定義すると、このときの回折効率は 85.7% であった。ただし、目標とする強度分布でも回折効率は 93.9% である。目標とする強度分布でも回折効率が 100% にならないのは、この分布が y 軸方向にガウス分布をしており、 1mm 幅の外にも強度が存在しているためである。

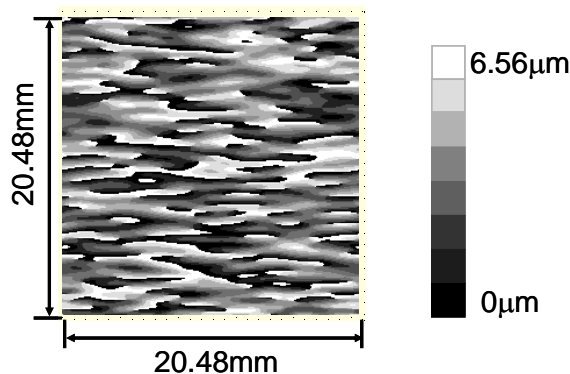


図 3.2 CGH 表面凹凸形状パターン（8 レベル）

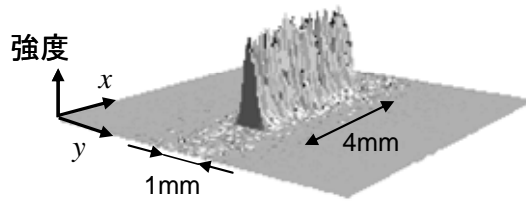


図 3.3 設計した CGH (8 レベル) を用いて強度分布整形を行った結果
(シミュレーション結果)

3.1.2 マスクめっき法

マスクめっき法による CGH の製作工程を図 3.4 に示す。銅基板にフォトレジストを塗布した後、フォトマスクを用いて CGH パターン (#1) の露光を行う。レジストを現像後、電気めっきにより、所定の厚さまで銅めっきを行う。このときフォトレジストで覆われている部分は、導電性がないために銅が析出せず、基板が露出している部分にだけ銅が析出する。その後、マスクとなっていたフォトレジストを有機溶媒で除去する。以上の工程を、図 3.4 上部に示すような #2 と #3 のフォトマスクを用いて繰り返すことで、8 レベルのマルチレベル構造をもつ CGH が製作できる。

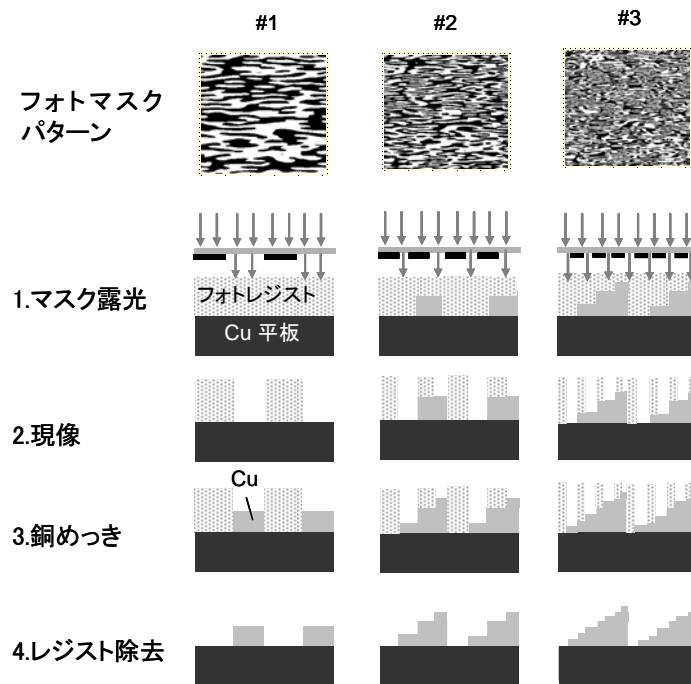


図 3.4 マスクめっき法による CGH の製作工程

CGH の基板には、一辺が 30mm の正方形で、厚さ 3mm の無酸素銅平板を用いた。はじめに基板をバフ研磨により $0.04\mu\text{mRa}$ 以下の表面粗さに研磨する。基板にポジ型フォトレジスト (クラリアントジャパン社, AZ1500) を $4\mu\text{m}$ 程度の厚さで塗布した後、マスクアライナーを用いて CGH パターンを露光し、現像を行う。フォトマスクでの露光には密着露光用のマスクアライナー (ズースマイクロテック社, MA6) を用いて行った。

銅めっきには、硫酸銅めっき浴[50]を利用した。この方法は、室温でのめっきが可能で、毒性が弱く、廃液の処理が容易といった利点があり、精密な厚さ制御が必要とされるプリント基板のめっきなどに利用されている。めっき装置の概略を図 3.5 に示す。めっき装置は安定化電源、電流計、めっき浴槽、電極、基板保持具などで構成する。また、めっきの光沢性に影響する塩素イオン濃度の変化を防ぐためにイオン交換膜を用いた。電源には一定の電流量を供給する安定化電源を用いた。めっき浴の組成は、イオン交換膜をはさんで陽極側に濃硫酸 150g/l、陰極側に硫酸銅 100g/l、塩酸 50mg/l、光沢剤（(有)ウイング社製）を適量混合した。めっき浴の温度は室温（18～24℃）とした。電極は陽極側に白金電極、陰極側に銅電極を用いた。CGH はこの銅電極で挟み込む形で保持した。CGH を保持するめっき治具の概略を図 3.6 に示す。めっき前には試料基板上の油などの不純物を除去するために、希硫酸を用いて基板洗浄を行っている。

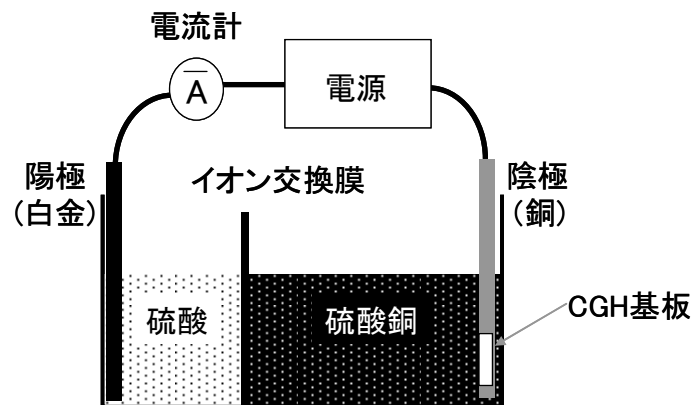


図 3.5 めっき装置の概略図

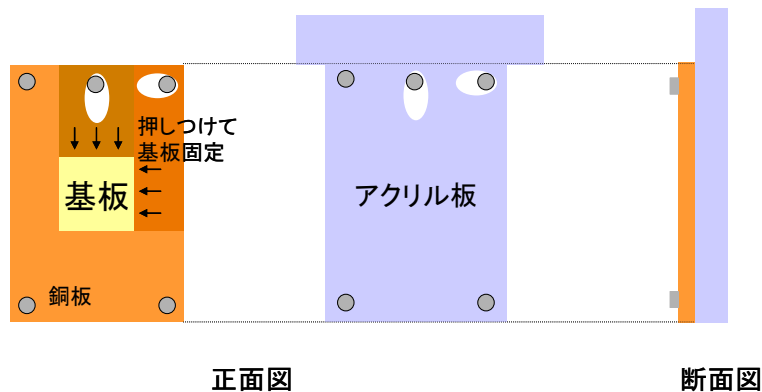


図 3.6 めっき治具の概略図

銅基板を陰極としてめっきを施した場合、一般に基板のエッジ部分での電流が大きくなり、基板中央部でのめっき層は薄くなる傾向にある。そこで、基板より十分に広い面積の銅板を保持具として用い、この保持具に基板を挟む形で保持することで、めっき厚さの均一性を確保した。

めっき厚さは、

$$[\text{めっき厚さ}] = k \times [\text{電流値}] \times [\text{平均電流効率}] \times [\text{めっき時間}] / [\text{めっきを施す面積}] \quad , \quad (3.1)$$

で表される． k はめっき金属によって決まる定数，電流値はめっき時に電極間に流れる電流値である．平均電流効率は，極間に流れる電流のうち，実際にめっき金属の析出に寄与した割合を示しており，試料やめっき装置で決まる．その他のめっきのパラメータには，めっき浴温度，めっき液の攪拌の有無がある．種々の予備実験を行い，めっき厚さの均一性が高くなるように，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値 0.82A，めっき浴温度 19~20℃である．めっき液の攪拌は行わなかった．このときのめっき速度は約 0.54 $\mu\text{m}/\text{min}$ であった．設定した条件で 8 レベルの CGH を製作した後，表面の腐食防止とレーザー光の反射率向上のために，CGH 表面に金薄膜を 50nm の厚さでスパッターコーティングした．

3.1.3 平面マルチレベル CGH の形状評価

製作した平面マルチレベル CGH を図 3.7 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．このパターンの大きさは 20.48mm である．また，図 3.8(a) は CGH 表面の光学顕微鏡写真である．図中の数字は CGH の各段を表しており，0 はめっきが施されなかった基板表面，7 が最もめっきが厚い部分を示している．段によって明るさが異なるが，これは表面粗さの違いによる．これについては後に詳しく述べる．図 3.8(a) から，CGH 面内にはピクセルの正方形形状（一辺 80 μm ）を最小単位とする CGH パターンが形成されていることがわかる．CGH 表面を数点測定した結果，ピクセル一辺の長さのずれは 1 μm 以下であった．また，フォトマスクのアライメント誤差によって発生する各段ごとの位置ずれは 5 μm 程度であった．数値シミュレーションによると，この程度の位置ずれは回折像に大きな影響を与えないことがわかっている．

図 3.8(b) は，3次元表面構造解析顕微鏡（Zygo 社，New View 5020）を用いて計測した CGH 中心近傍の表面凹凸形状である．図中の 0~7 の数字は図 3.8(a) と同じく，各段を示している．CGH 上で 3 点×3 点の観察点を均等に選び，それぞれの観察点における CGH 各段の高さを測定した．表 3.1 に，上記 9 箇所における高さの測定値を平均したもの，および標準偏差を示す．また，表面粗さ R_a については CGH 中央で測定した結果を示している．測定された各段の高さの平均値(AH)は，設計値(DH)より 10~15%程度大きく，また，それぞれの段における高さのばらつきの標準偏差(SD)は高さの設計値(DH)に対して 10~22%であった．

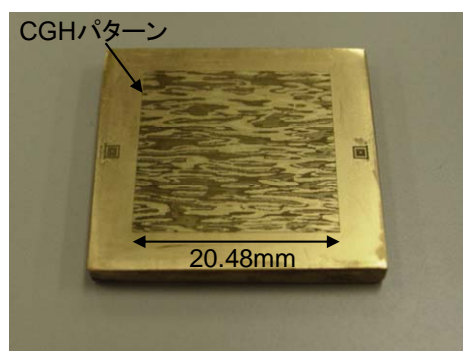


図 3.7 製作したマルチレベル CGH

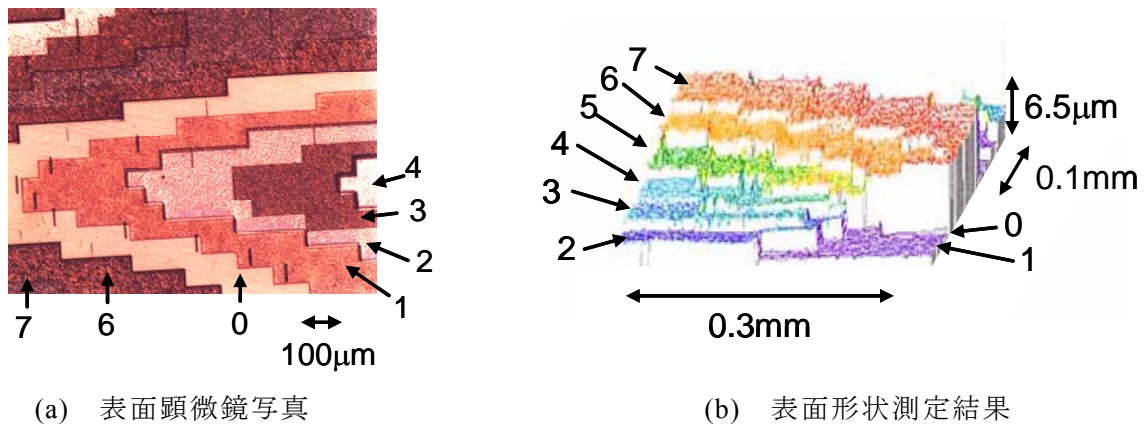


図 3.8 製作した CGH の表面形状測定例

表 3.1 表面形状測定結果

レベル数	設計高さ (DH) [µm]	平均高さ (AH) [µm]	平均高さと設計高さの差 (AH-DH) [µm]	高さの標準偏差 (SD) [µm]	標準偏差と設計高さの比 $100 \cdot SD/DH$ [%]	表面粗さ Ra [µm]	めっき回数
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.037	0
1	0.94	1.04	0.10	0.18	19.1	0.036	1
2	1.87	2.15	0.28	0.41	21.9	0.042	1
3	2.81	3.08	0.27	0.49	17.4	0.172	2
4	3.75	4.17	0.42	0.42	10.9	0.053	1
5	4.68	5.24	0.56	0.62	13.2	0.225	2
6	5.62	6.17	0.55	0.96	17.1	0.173	2
7	6.56	7.60	1.04	0.78	11.9	0.391	3

表面粗さについては、めっきを1回だけ行った面（1，2，4段目）は $0.05\mu\text{mRa}$ 程度であり、元の基板の表面粗さ $0.04\mu\text{mRa}$ と同程度であった。めっきを2回行った面（3，5，6段目）と3回行った面（7段目）の表面粗さの最大値は、それぞれ $0.225\mu\text{mRa}$ 、 $0.391\mu\text{mRa}$ であり、めっき層を積み重ねるにつれて、表面粗さは大きくなっている。この面を可視光で観察する場合、これらの表面粗さの違いは反射率に大きく影響し、図 3.8(a)の顕微鏡写真においても、表面粗さの大きい段が暗く観察されている。しかし、いずれも炭酸ガスレーザー光の波長 $10.6\mu\text{m}$ に比べて十分に小さいので、実際の使用では大きな反射率の差にはならない。

3.1.4 反射型平面マルチレベル CGH によるレーザー光強度分布整形

製作した反射型平面マルチレベル CGH の光学的性能を評価するために、低出力の炭酸ガスレーザーを用いて、レーザー光強度分布整形の実験を行った。実験装置の構成を図 3.9 に示す。使用したレーザー（SYNRAD 社 48-1W）は最大出力 10W 、ビーム径 $\phi 3.5\text{mm}$ でガウス分布をしている。2枚のビームスプリッターを用いて強度を約 $1/40,000$ に減光し、ビームエキスパンダによりビーム径を $\phi 14\text{mm}$ に広げる。これを CGH に入射し、反射光を焦点距離 127mm のレンズで集光する。レンズの焦点位置に整形されたレーザー光があらわれる。整形

されたレーザー光を赤外線カメラ（三菱電機，IR-U300）で観察した。

赤外線カメラで観察した結果を図 3.10 に示す。得られた観察像は矩形形状が明確に観察されており，大きさは約 $1\text{mm}\times 4\text{mm}$ であった。図 2.22 に示した曲面バイナリCGH で整形されたレーザー光強度分布と比べ，0 次光強度も小さく，マルチレベル化したことにより，より目標とする強度分布に近い強度分布が得られた。しかし，観察結果からはスペックルのような強度むらが見られ，図 3.3 のシミュレーション結果よりも強度むらが大きい。この強度むらの原因については，後で詳述する。

回折効率を「赤外線カメラで測定されたレーザー光強度の総和に対する整形したレーザー光（ $1\text{mm}\times 4\text{mm}$ ）内の強度（0 次光強度をのぞく）の割合」と定義して回折効率を評価した。図 3.9 のレンズの焦点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をパワーメータ（MELLES GRIOT 社，13PEM001，受光面の大きさ $\phi 10\text{mm}$ ）を用いて計測した。遮蔽板がある場合とない場合での光強度を測定し，それらの比を求めた結果，回折効率は 70.8% であった。

この値には，回折像中央付近の 0 次光も含まれているため，回折効率を求めるには 0 次光強度分を除く必要がある。0 次光強度の値を赤外線カメラの出力画像データから次のように見積もった。はじめに 0 次光の位置と大きさを，0 次光の理論スポットサイズ $\phi 235\mu\text{m}$ を考慮して，強度分布の最大値を中心とした一辺の長さが $240\mu\text{m}$ の正方形とした。一辺 $240\mu\text{m}$ の正方形の領域は赤外線カメラのピクセル 6×6 個に相当する。このピクセル 6×6 個内の強度和から，回折像内の 1 ピクセルあたりの平均強度とピクセル数 $36 (=6\times 6)$ の積を引いた値を 0 次光強度とした。このようにして得られた 0 次光強度と回折像内の全強度の比は 2.2% であった。矩形開口を用いて得られた結果（70.8%）から，この 0 次光強度 ($70.8\% \times 0.022$) を差し引いた結果，回折効率は 69.2% になった。図 3.3 で示した設計時の数値シミュレーションにおける回折効率は 85.7% であり，理論と実験での効率の差は 16.5% であった。

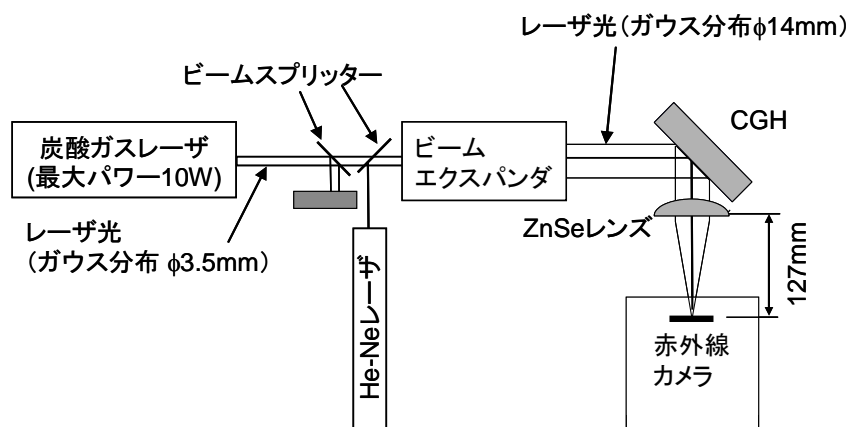


図 3.9 反射型平面マルチレベル CGH を用いた強度分布整形実験系の概略図

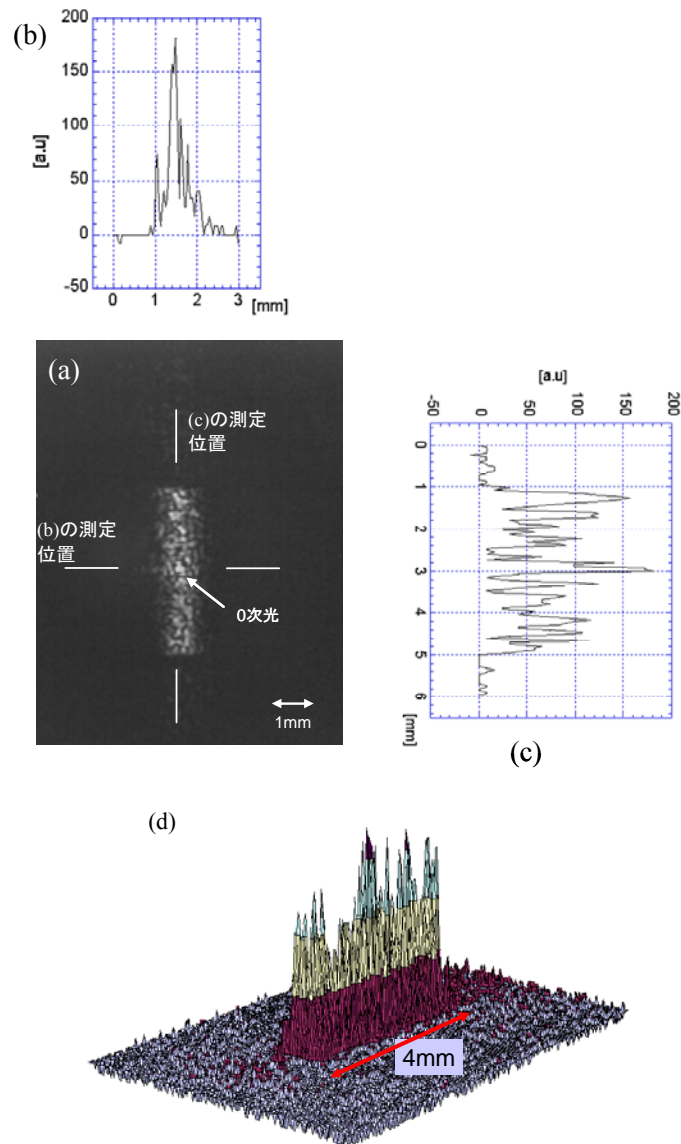


図 3.10 強度分布の整形結果 (a)カメラ画像, (b)ガウス分布方向の強度分布, (c)一様強度方向の強度分布, (d)三次元強度分布

表 3.1 から製作した CGH における各レベルの平均高さ(AH)は設計高さ(DH)よりも大きくなっている. 平均高さと設計高さの差を用いて, 整形されたレーザ光強度分布強度分布を求めるシミュレーションを行った. 具体的には, 各めっき時のめっき速度のばらつきを想定し, CGH の各レベルごとに同じ量の高さずれが生じていると考え, 各レベルに測定結果の高さずれを与え, 整形されたレーザ光強度分布を求めた. シミュレーション結果を図 3.11 に示す. 0 次光が発生する像中心での強度は, 設計値に比べ, 約 5.0 倍の強さになった. 実際の測定結果では 0 次光強度は像内の平均強度の 2.7 倍である. このことから, 0 次光発生の原因は CGH の段差の高さずれにあることがわかる. しかし, この段差の高さずれは強度むらの主要な原因ではない.

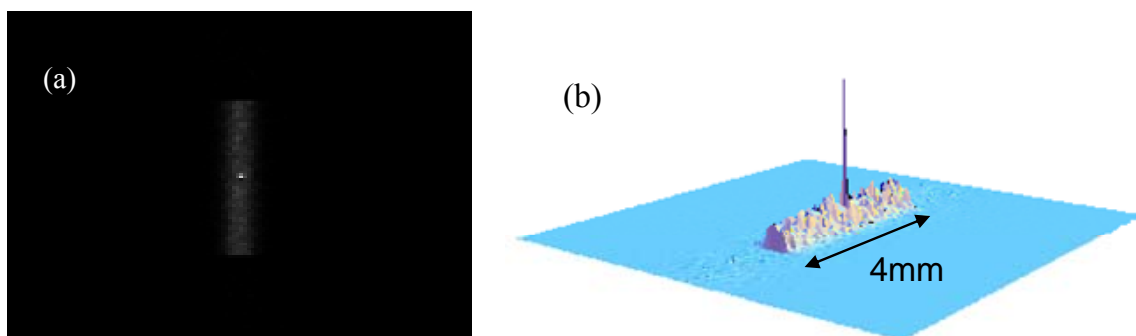


図 3.11 CGH の各レベルごとに高さずれが存在した場合の整形されたレーザー光強度分布 (a)二次元表示, (b)三次元表示

めっきの場所的な不均一により, 平均高さが CGH の領域ごとにばらついている. この影響を調べるために, $5\text{mm} \times 5\text{mm}$ を一つの領域として CGH 全体を 4×4 個の領域に分け, 領域間での高さ平均のばらつきを標準偏差 $0.5\mu\text{m}$ (最小段差 $0.94\mu\text{m}$ の $1/2$ 程度) で与えて, 整形されたレーザー光強度分布を求めた. シミュレーション結果を図 3.12 に示す. この場合, 図 3.10 に見られるスペックルのような強度むらが発生している. 従って, 強度むらの原因はある程度大きな領域ごとの高さずれである. ただし, この場合の強度分布での回折効率は 85.3% であった.

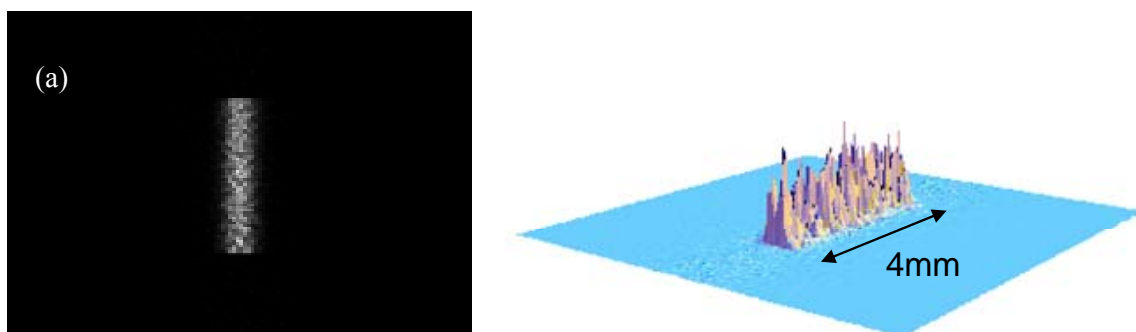


図 3.12 CGH の領域ごとにばらつきが存在した場合の整形されたレーザー光強度分布 (a)二次元表示, (b)三次元表示

次に回折効率の低下原因について検討した. はじめに, めっき速度の場所的な不均一のために, 各ピクセルごとに高さずれが生じた場合を想定した. 測定結果から CGH の各レベル内での高さのばらつきは標準偏差(SD)で $0.2 \sim 1.0\mu\text{m}$ であるため, 各ピクセルごとに高さのばらつきを標準偏差 $0.6\mu\text{m}$ でランダムに与え, 整形されたレーザー光強度分布を計算した. シミュレーション結果を図 3.12 に示す. この場合, 回折効率は 64.9% であり, 実験値 (69.2%) に近い値が得られた. 図からは強度分布は良好なように見られるが, $1\text{mm} \times 4\text{mm}$ の像以外のところの強度が高く, そのために回折効率が低下している.

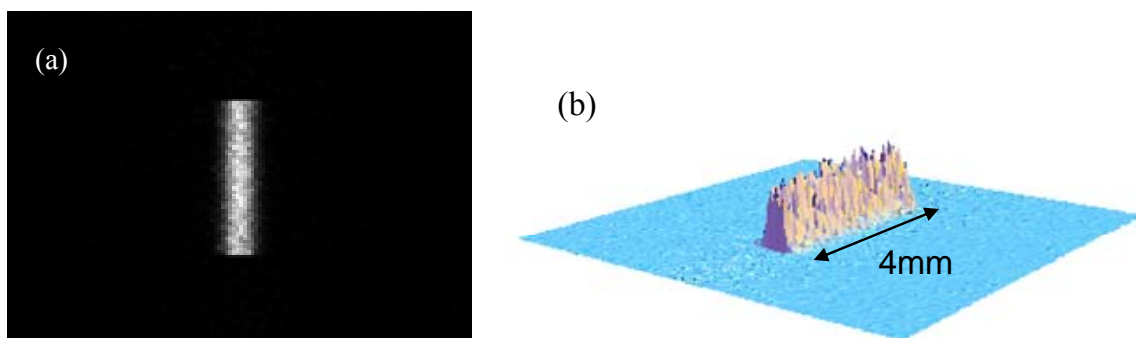


図 3.13 CGH の各ピクセルごとに高さずれが存在した場合の整形されたレーザー光強度分布 (a)二次元表示, (b)三次元表示

最後に表面粗さの影響について検討を行った。表面粗さについては、CGH の 1 ピクセルをさらに 8×8 のセルに分け、それぞれに標準偏差 $0.2\mu\text{m}$ でランダムな凹凸を与えて整形されたレーザー光強度分布を計算した。シミュレーション結果を図 3.14 に示す。その結果、図 3.3 に示した設計した CGH で得られるレーザー光強度分布とほぼ同じ強度分布が得られ、回折効率も 83.3%であり、設計した CGH の場合 (85.7%) とほぼ同程度であった。標準偏差 $0.2\mu\text{m}$ 程度の表面粗さは、レーザー光の波長 $10.6\mu\text{m}$ と比べても十分に小さく、強度分布整形にはほとんど影響ない。

以上のシミュレーション結果から、0 次光の発生原因は各レベルの平均高さの設計値からのずれにあり、強度むらの原因は CGH 内のある程度大きな領域間での平均高さのばらつきにあることがわかった。また、回折効率の低下の主な原因は、CGH の各ピクセルごとの高さのばらつきにあった。

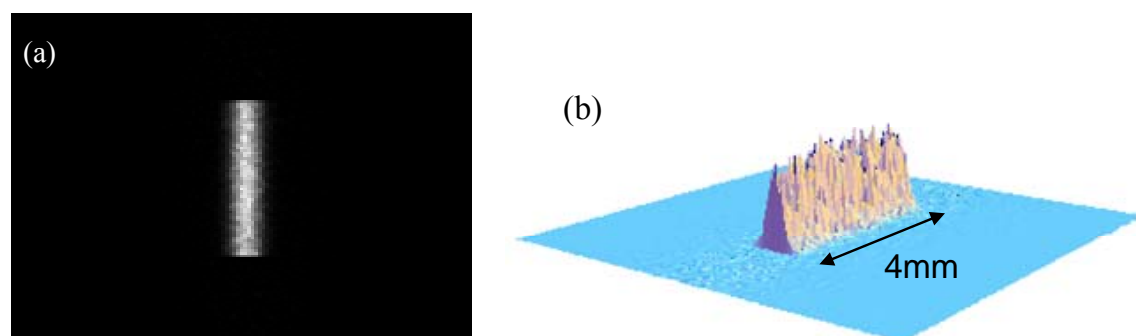


図 3.14 CGH の表面粗さを考慮した場合の整形されたレーザー光強度分布 (a)二次元表示, (b)三次元表示

図 3.9 に示すビームスプリッターを取り除いて整形したレーザー光をアクリル板に照射してバーンパターンを観察した。約 1 秒照射した結果を図 3.15 に示す。約 $1\text{mm} \times 4\text{mm}$ の大きさのバーンパターンが得られた。図 2.25 に示したバイナリーCGH の場合と比べ、パターン深さの均一性も向上していた。これはマルチレベル化することにより、バイナリーCGH の場合に存在した、針状のノイズが低減された結果である。

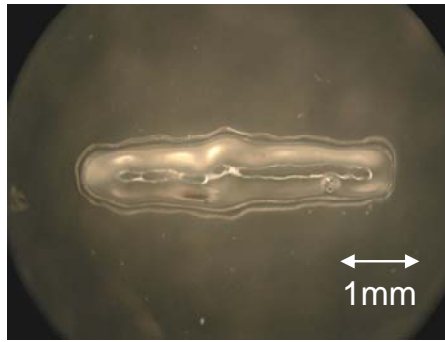


図 3.15 アクリル板に整形したレーザー光を照射した結果

3.1.5 平面マルチレベル CGH の高出力炭酸ガスレーザーへの適用

製作した CGH を高出力炭酸ガスレーザー加工機（川崎重工業社，AF-5L，最大出力 5kW）に搭載した．CGH を搭載した様子を図 3.16 に示す．レーザー光は図の上方よりφ14mm の平行光で出力され，鏡により折り返された後，CGH に入射し，その反射光を焦点距離 127mm のレンズで集光する構成になっている．CGH の温度上昇による破損を避けるために，内部に冷却水路を持つアルミ基板上に CGH を密着固定し，基板内部に冷却水を循環させることで，CGH の温度上昇を抑制した．CGH に 200W のレーザー光を数秒間にわたって照射したが，CGH 表面に損傷は見られなかった．

CGH 入射前のレーザー光強度分布，および CGH で整形されたレーザー光強度分布の測定結果を図 3.17 に示す．CGH 入射前のレーザーパワーは 200W である．強度分布はレーザービームアナライザー（Prometec 社，Laser scope UFF100）を用いて測定した．いずれも左図が二次元表示であり，右図は左図の線上の強度分布である．整形されたレーザー光強度分布は長方形に近い強度分布をしているが，図 3.10 に示した低出力の炭酸ガスレーザーの場合に得られた形状よりも大きくなった．この原因としては，CGH に入射するレーザー光の強度分布がガウス分布からずれたものになっていること，および CGH の設置ずれなどが考えられる．

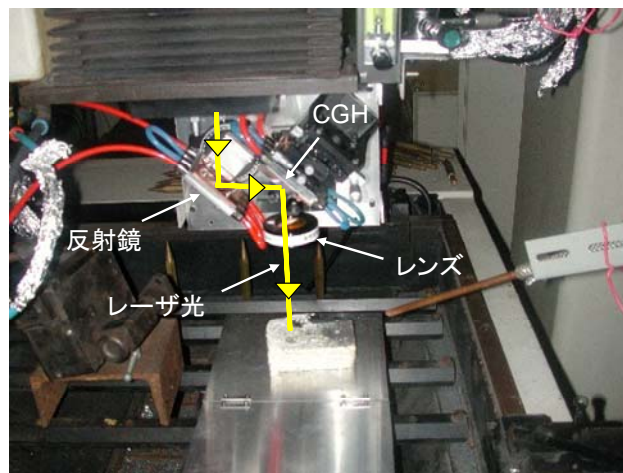
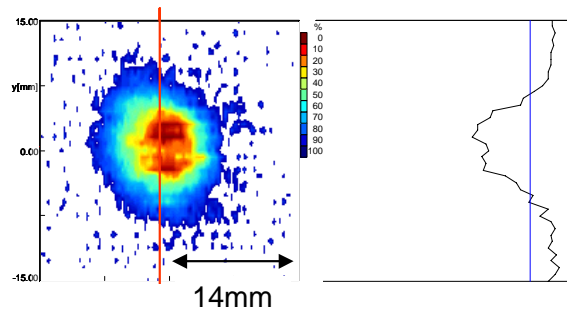
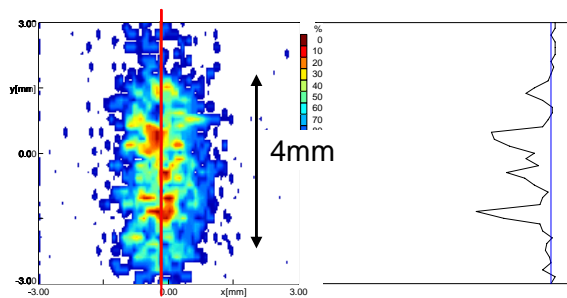


図 3.16 CGH を高出力炭酸ガスレーザーに搭載した様子



二次元表示 線上の強度分布
 (a)CGH 入射前のレーザー光強度分布



二次元表示 線上の強度分布
 (b)整形されたレーザー光強度分布

図 3.17 レーザ光強度分布の測定結果

整形したレーザー光をアクリル板に照射してバーンパターンの観察を行った．約 1 秒間照射した結果を図 3.18 に示す．レーザー照射時にはアクリルの燃焼を防ぐため、乾燥空気を試料に吹き付けた．長方形の形状でアクリルが除去されており、レーザー光の強度分布を長方形の形状に整形できていることを示している．しかし、このバーンパターンは図 3.17 の整形されたレーザー光の強度分布が不均一であったという結果を反映して、深さは不均一で、不要な箇所にもレーザー光が照射されている．低出力レーザーを用いた場合は、良好な強度分布整形が行うことができていたことから、これらの整形された強度分布の乱れは CGH に入射するレーザー光の強度分布や CGH の設置ずれなど CGH の設計、製作以外の原因によるものである．



(a) 照射方向から観察 (b) 照射方向に直交する方向から観察

図 3.18 整形したレーザー光をアクリルに照射した結果

3.2 マーキング用 CGH の開発

3.2.1 マーキング用 CGH の設計

マルチレベル CGH を用いることにより、より複雑な強度分布を作り出すことができる。ここではレーザーマーキング用 CGH を例に、その試作を行った。また前節において高精度な強度分布整形を実現するためには、精密なめっき技術の開発、つまりめっきの厚さの制御と不均一さの改善が必要であることが明らかになっており、本節ではマーキング用 CGH の試作を通して、めっきの厚さの制御と不均一さの改善にも取り組んだ。

CGH は前節と同じように、銅の平板表面に微細な多段形状を持つ反射型マルチレベル CGH とした。CGH を用いる光学系も、前節と同様に炭酸ガスレーザー光を 45° の角度で CGH に入射させて、レンズの焦点位置で目標とするレーザー光強度分布に整形する系を用いる。CGH に入射する炭酸ガスレーザー光は、ビーム径が（ピーク強度の $1/e^2$ の径）が 14mm で、ガウス分布である。整形の目標とする光強度分布は、図 3.19 に示す大阪府立産業技術総合研究所のロゴマーク（TRI マーク）で、文字内は均一な強度とした。



図 3.19 目標とするレーザー光強度分布

ここでは CGH のピクセルサイズを $d \times d = 160\mu\text{m} \times 160\mu\text{m}$ とし、ピクセル数を $N \times N = 128 \times 128$ とした。従って、CGH パターン全体の大きさは $D \times D = 20.48\text{mm} \times 20.48\text{mm}$ ($= 128 \times 160\mu\text{m}$) で正方形形状である。CGH の凹凸形状パターンの設計には、これまでと同じく GS 法[48]を利用した。反復計算回数を 1000 回までとった場合の、計算回数に対する平均誤差および回折効率の変化を図 3.20 に示す。ただし、平均誤差は(2.48)式に示した強度分布の 2 乗平均誤差である。また、回折効率は入射光強度に対する文字内の強度の比である。計算回数を増やすほど平均誤差と回折効率は改善されているが、500 回程度で効率および平均誤差の大きさはほぼ収束している。

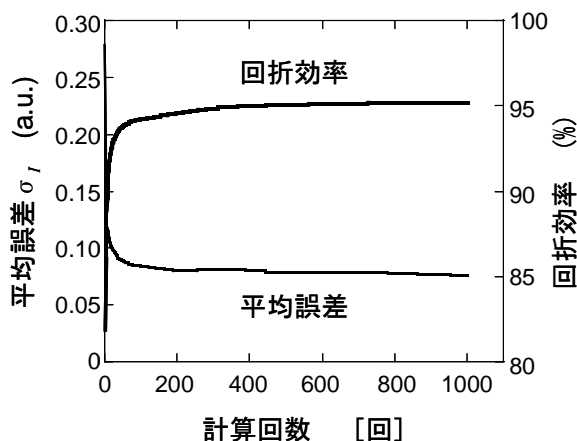


図 3.20 計算回数と平均誤差および回折効率の関係

反復計算回数を 500 回とし，初期値を変えて CGH を 5 パターン設計した．そのなかで平均誤差と回折効率が最も良好であった CGH を選択し，凹凸形状を 2，4，8，16 レベルに離散化した場合の強度分布を計算した．結果を図 3.21 に示す．4 レベル以上でロゴマークを確認することができる．また，レベル数が大きいほど平均誤差は小さく，回折効率が高いことがわかる．今回は，90%以上の回折効率が期待できる 8 レベルの CGH を製作することにした．



(a) 離散化なし
(平均誤差 0.078, 回折効率 95.0%)



(b) 16 レベル
(平均誤差 0.085, 回折効率 94.1%)



(c) 8 レベル
(平均誤差 0.102, 回折効率 91.2%)



(d) 4 レベル
(平均誤差 0.161, 回折効率 81.1%)



(e) 2 レベル
(平均誤差 0.327, 回折効率 57.2%)

図 3.21 設計した CGH で得られる整形されたレーザー光強度分布
(シミュレーション結果)

3.2.2 マーキング用 CGH の製作

めっき厚さの制御と不均一さを改善するために基板保持具を改良した．銅基板を陰極としてめっきを施した場合，一般には基板のエッジ部分での電流が大きくなり，めっき厚さ

が中央部よりも厚くなる。これまでは図 3.6 に示すめっき治具を用い、複数の銅板で CGH の基板を挟んでめっきすることで、エッジ部の電流が大きくなることを防いでいた。しかし、この治具では基板と治具表面の間に段差が生じ易く、また CGH 基板の製作精度によって導通が不十分になる可能性があった。CGH と治具の間の導通が不十分な場合、CGH 表面の電流密度が不均一になり、めっき厚さも不均一になる。

そこで、図 3.22 に示す基板より十分に広い面積の銅板を治具として使い、この治具に基板を埋め込む形でめっきを行うようにした。CGH 基板表面と治具表面に段差が生じないように、CGH 端部と治具に位置決め用の当たり面を設け、ねじで CGH を背面から治具に押しつけるようにした。また、この当たり面は導通の確保にも貢献している。

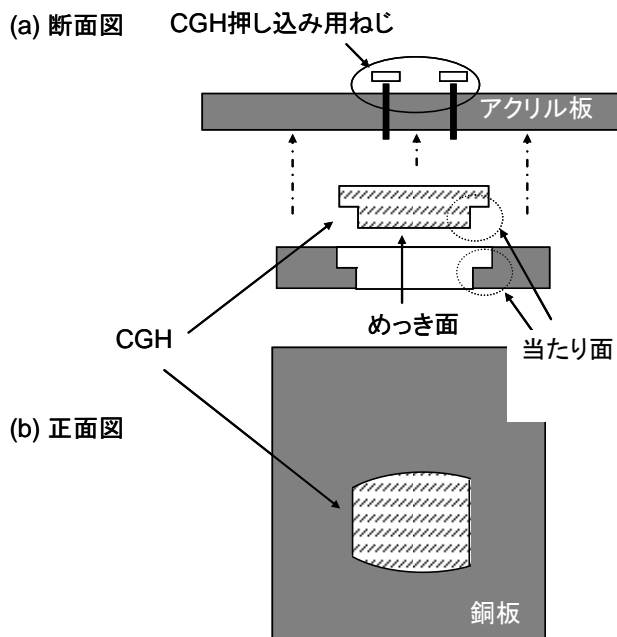


図 3.22 改良しためっき治具の概略図

電流値 0.5A、めっき浴温度 18~24°C (室温) の条件でマスクめっき法を用いて 8 レベルの CGH を製作した。この場合のめっき速度は 0.6 $\mu\text{m}/\text{min}$.であった。製作したマーキング用マルチレベル CGH を図 3.23 に示す。また図 3.24 に 3 次元表面構造解析顕微鏡 (Zygo 社, New View 5020) を用いて計測した CGH の表面凹凸形状の一例を示す。図 3.24(b)は(a)に示す線上の断面形状である。CGH 面内にはピクセルの正方形形状 (一辺 160 μm) を最小単位とする CGH パターンが形成されている。



図 3.23 製作した CGH

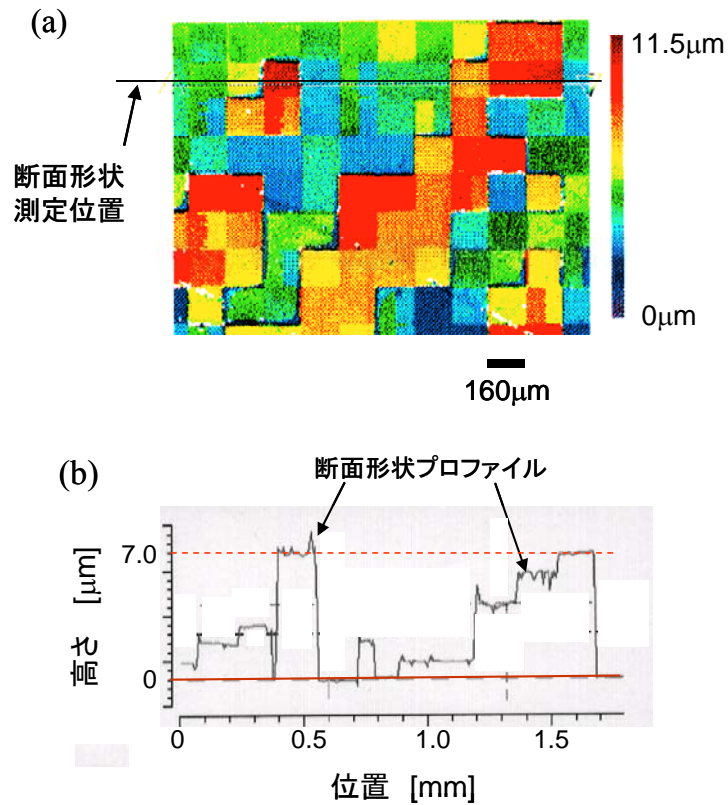


図 3.24 CGH 表面形状の測定結果
 (a) CGH 表面高さ分布, (b) CGH 断面形状

CGH 表面の凹凸形状を数点測定した結果を表 3.2 に示す. 表には比較のため表 3.1 に示した測定結果もあわせて示す. また, 図 3.25 にめっき回数と各レベル番号の関係を示す. 今回製作した CGH の平均高さ与设计高さの差(AH-DH)は最大 $0.28\mu\text{m}$ であった. また, 高さの標準偏差(SD)は最大 $0.29\mu\text{m}$ であった. 表 3.1 の結果と比べると, いずれのレベルでも, 平均高さ与设计高さの差および標準偏差を改善することができた.

表 3.2 CGH 表面形状測定結果

レベル数	設計高さ (DH) [μm]	平均高さ (AH) [μm]	平均高さ与设计高さの差 (AH-DH) [μm]	平均高さ与设计高さの差 (表 3.1) [μm]	標準偏差 (SD) [μm]	標準偏差 (表 3.1) [μm]	めっき回数
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
1	0.94	0.89	-0.05	0.10	0.06	0.18	1
2	1.87	1.87	0.00	0.28	0.17	0.41	1
3	2.81	2.87	0.06	0.27	0.29	0.49	2
4	3.75	3.97	0.22	0.42	0.17	0.42	1
5	4.68	4.72	0.04	0.56	0.29	0.62	2
6	5.62	6.03	0.41	0.55	0.16	0.96	2
7	6.56	6.84	0.28	1.04	0.06	0.78	3

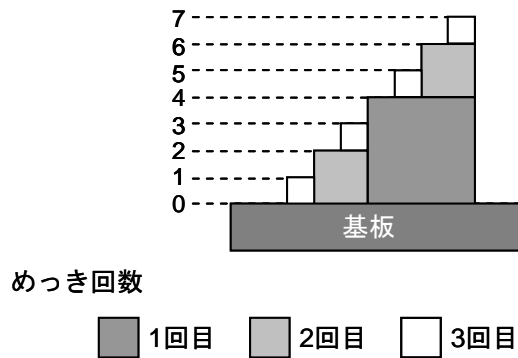


図 3.25 めっき回数と各レベル番号の関係

一方、今回製作した CGH では、レベル 4~7 における高さの差がレベル 1~3 における高さの差よりも大きくなっている。

表 3.2 の平均高さ与设计高さの差を CGH パターン中心付近とパターン端部に分けた結果を表 3.3 に示す。レベル 1~3 では、CGH パターン中心付近と CGH パターン端部にはあまり差がないが、レベル 4~7 では CGH パターン端部における高さの差が大きくなっている。このパターン端部のめっき高さのばらつきが、表 3.2 におけるレベル 4~7 の高さの差の原因になっている。パターン端部の高さがばらつくことについては、今後、さらに検討を行う必要がある。

表 3.3 CGH パターン中央部と端部における高さの差の比較

レベル数	平均高さ与设计高さの差 (中心) [μm]	平均高さ与设计高さの差 (端部) [μm]	めっき回数
0	0.00	0.00	0
1	-0.07	0.00	1
2	0.17	-0.08	1
3	0.18	0.00	2
4	0.18	0.31	1
5	0.13	-0.28	2
6	0.22	0.50	2
7	0.31	0.22	3

3.2.3 マーキング用 CGH による強度分布整形の評価およびマーキング加工実験

最大出力 10W の炭酸ガスレーザを用いて、製作した CGH による強度分布整形の評価実験を行った。光学系は前節に示した図 3.9 と同じである。整形したレーザ光を赤外線カメラで観察した結果を図 3.26 に示す。レーザ光を目標とする TRI のロゴマークに整形できており、CGH を用いることによって細かいパターンへの整形も実現できた。なお、文字内にスペックルのような強度むらも見られるが、これは図 3.21(c)に示した、設計した CGH を用いた場合の強度分布のシミュレーション結果にも見られており、必然的に生じるものである。

図 3.26 の明るさのデータを数値化した結果、文字のない部分の光強度（ノイズ）は 0~3（単位は任意）、文字部分の光強度（0 次光による最大値を除く）は 0~14 であった。また、最大の強度は中央部分の 18 であり、図 3.26 から、やや 0 次光周辺の強度が高いことがわかる。3.2 節のシミュレーション結果から、0 次光の発生原因はめっき厚さの製作ずれにあるため、素子製作技術をさらに改善する必要がある。

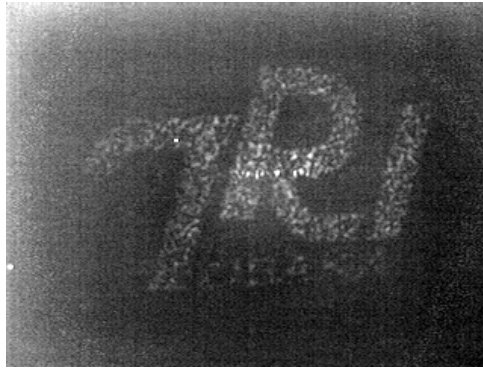


図 3.26 CGH により整形されたレーザー光の観察像

整形したレーザー光をアクリル板に約 1 秒間照射した結果を図 3.27 に示す。レーザーパワーは 8W とした。TRI のロゴマークの形で、ほぼ設計どおりの大きさにアクリルが除去されており、アクリルへのマーキングを行うことができた。ただし、除去深さは強度分布を反映して一様でなく、0 次光のある位置が最も深く除去されていた。強度分布の整形結果を、さらに目標とする強度分布に近づけるためには、前述したとおり素子製作技術の改善が必要である。

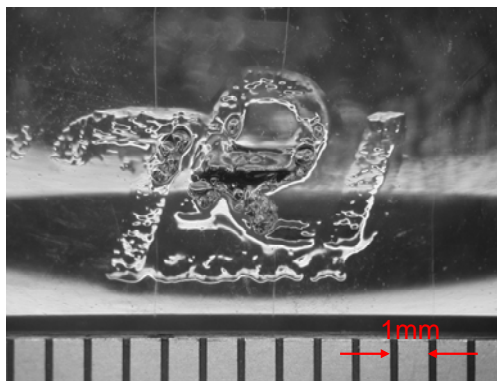


図 3.27 整形したレーザー光によるアクリルバーンパターン
レーザーパワー 8W, 照射時間約 1 秒

3.3 まとめ

本章では、反射型平面マルチレベル CGH の実現に取り組んだ結果について述べた。さらにマーキング用の CGH の開発に取り組んだ結果についても述べた。CGH の製作では、銅平板にパターンニングされたフォトレジストをマスクとして銅めっきを行うプロセスを繰り返して、多段形状を製作する「マスクめっき法」の手法を用いた。

はじめにガウス分布のレーザー光を矩形ガウス分布に整形する CGH を製作した。製作した CGH を用いて強度分布整形を行った結果、レーザー光を 1mm×4mm の矩形形状に整形することができ、その強度分布は、バイナリー形状の CGH の場合と比べて 0 次光強度およ

びノイズが小さく、目標とする強度分布に近い分布であった。また、高出力炭酸ガスレーザー加工機に CGH を搭載し、高出力レーザー光の強度分布整形を行った結果、CGH に損傷なく、強度分布を整形することができた。ただし、整形された強度分布は、目標とする強度分布よりも大きく、ノイズも大きかった。これは CGH に入射する高出力レーザー光の強度分布や CGH の設置ずれなどが原因である。

さらに、マーキング用の CGH の開発では、めっき層の凹凸高さの精度を向上させるためにめっき治具を改良した。めっき治具を改良した結果、凹凸高さの設計値からのずれを $0.28\mu\text{m}$ 以下、高さの標準偏差を $0.29\mu\text{m}$ 以下にすることができた。改良前の値はそれぞれ $1.04\mu\text{m}$ 以下と $0.96\mu\text{m}$ 以下であり、大幅に改善することができた。強度分布整形実験を行った結果、設計どおり複雑な強度分布に整形でき、アクリル板にマーキングすることができた。

第 4 章 反射型曲面マルチレベル CGH の開発

第 3 章では銅の平板上にマルチレベルの反射型 CGH を製作し、高出力レーザー加工機の強度分布整形を行った。本章では、第 2 章で述べた曲面上へのレーザー描画技術と前章で述べたマスクめっき法によるマルチレベル形状を製作する技術を組み合わせて、放物面鏡上に 8 レベルの CGH を製作した結果について述べる。製作時にめっき条件の最適化を行った結果についても述べる。また、高出力炭酸ガスレーザー加工機に CGH を搭載し、整形したレーザー光を鉄鋼材料に照射して、熔融特性について調べ、強度分布整形の効果について検討した結果についても述べる。

4.1 反射型曲面マルチレベル CGH の設計

曲面マルチレベル CGH を利用したレーザー加工の模式図を図 4.1 に示す。光源は波長 $10.6\mu\text{m}$ 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（ピーク強度の $1/e^2$ の径） 14mm のガウス分布とする。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、目標とするレーザー光強度分布に整形される。

目標とするレーザー光強度分布は、レーザー表面処理に適用することを想定して、(2.43)式に示した x_2 軸方向に幅 4mm で一様な分布、 y_2 軸方向にはピーク強度の $1/e^2$ の幅が 1mm のガウス分布とした。

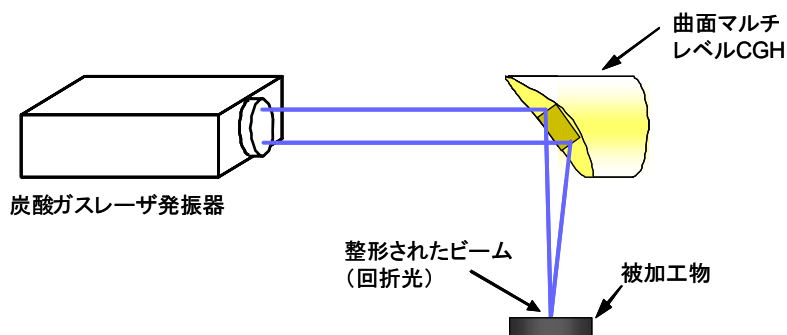


図 4.1 曲面マルチレベル CGH を利用したレーザー加工の模式図

曲面マルチレベル CGH の模式図を図 4.2 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 4.2 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。

CGH の凹凸形状の設計には、GS 法[48]を用いた。GS 法で得られた 0 から 2π の間の連続した位相分布を 8 段階に量子化して、CGH パターンを設計した。

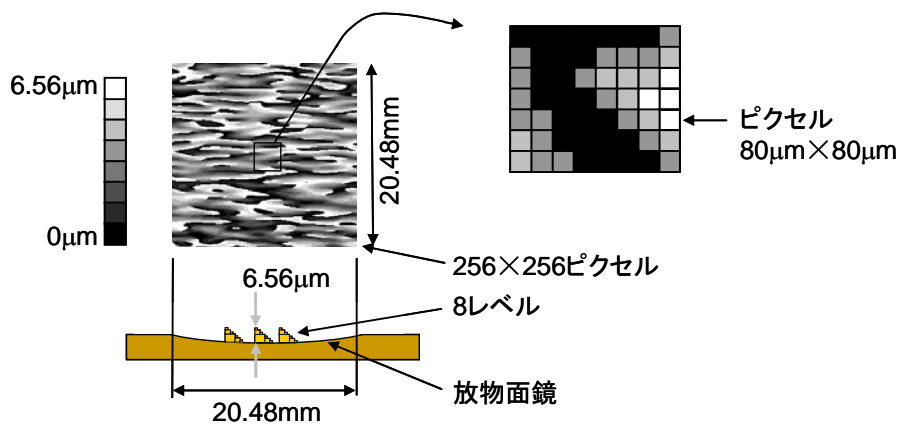


図 4.2 曲面マルチレベル CGH の模式図

4.2 めっき条件の最適化

3.3 節で CGH パターン周辺部のめっき厚さにばらつきが生じていたため、CGH 製作の前に、めっき条件について再検討を行った。再検討に用いたテストめっきパターンの模式図を図 4.3 に示す。図は CGH の基板と、テストめっきを行う形状を表しており、図の青色の領域がレジストでマスクされる領域で、茶色の領域が、めっきが施される領域である。青色で示すマスク内に均等に配置した 4×4 個のめっき領域があり、この領域のめっき形状からめっきの状態を評価する。青色のマスク領域は CGH パターンと同じ大きさで $20.48\text{mm} \times 20.48\text{mm}$ である。マスク内のめっき領域は $3\text{mm} \times 3\text{mm}$ の大きさである。

めっき浴の攪拌の必要性和電流密度について再検討を行った。めっき浴とめっき治具は 3.3 節の平面マルチレベル CGH の製作に用いたものを利用した。なお、検討では、厚さ $3.75\mu\text{m}$ を目標としてめっきを行い、その結果を用いて評価した。この厚さは、マルチレベル CGH 製作時の 1 回目の工程でめっきする厚さである。

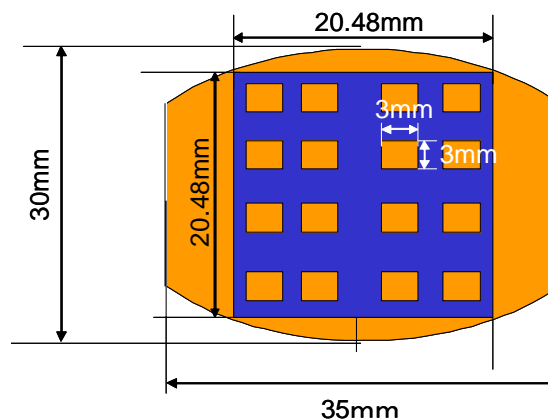


図 4.3 テストめっきパターン

まず、めっき浴攪拌の必要性について検討した。めっき浴の攪拌は、図 4.4 に模式的に示すように、陰極（治具+基板）側のめっき浴内の銅イオンの均一化にあり、エアを陰極側のめっき浴内に供給する方法で行った。なお、めっき時の電流値は 0.5A とした。

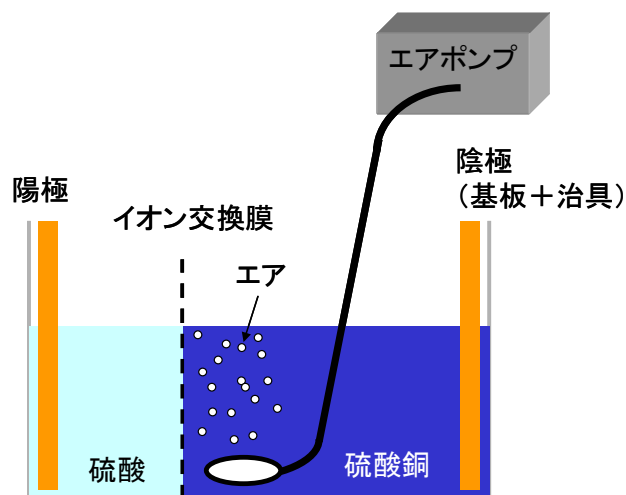


図 4.4 エアによるめっき浴の攪拌

めっき後、めっきを施した16箇所について各領域ごとにめっきの高さを8点ずつ計測し、それぞれの平均高さを求めた。測定には3次元構造解析顕微鏡（Zygo社 New View 5020）を用いた。16点の平均高さの最大値と最小値の差（高さの最大差）およびばらつきの標準偏差を図4.5に示す。攪拌を行わない方が、高さの最大差とばらつきは小さいことがわかる。

次に、めっき時の電流密度について検討した。電流値を0.125、0.25、0.50Aとし、攪拌を行わない条件でめっきを行い、攪拌の影響の場合と同様に凹凸高さを測定した。高さの最大差とばらつきの標準偏差を図4.6に示す。電流値が小さくなるにつれて高さの最大差とばらつきは小さくなっていくことがわかる。しかし、電流値を0.125Aとした場合、図4.7に示すようにめっき端部のエッジが滑らかになる現象が際だって見られた。従って、電流値0.25Aの条件が最適と判断した。

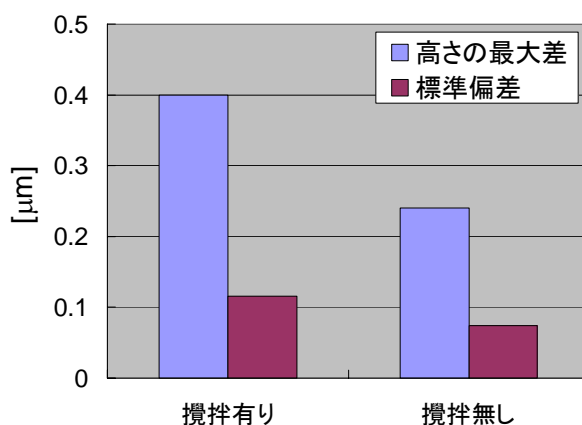


図 4.5 凹凸高さに及ぼす攪拌の影響

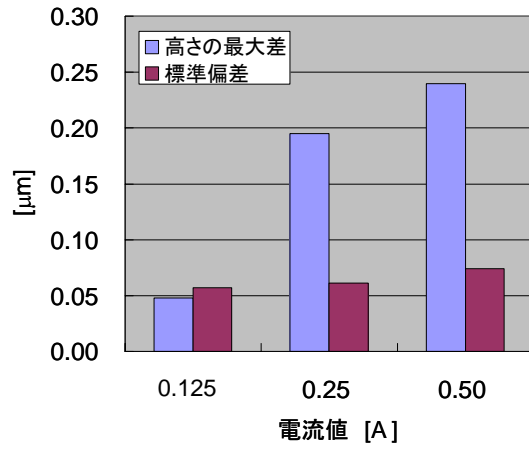


図 4.6 凹凸高さに及ぼす電流値の影響

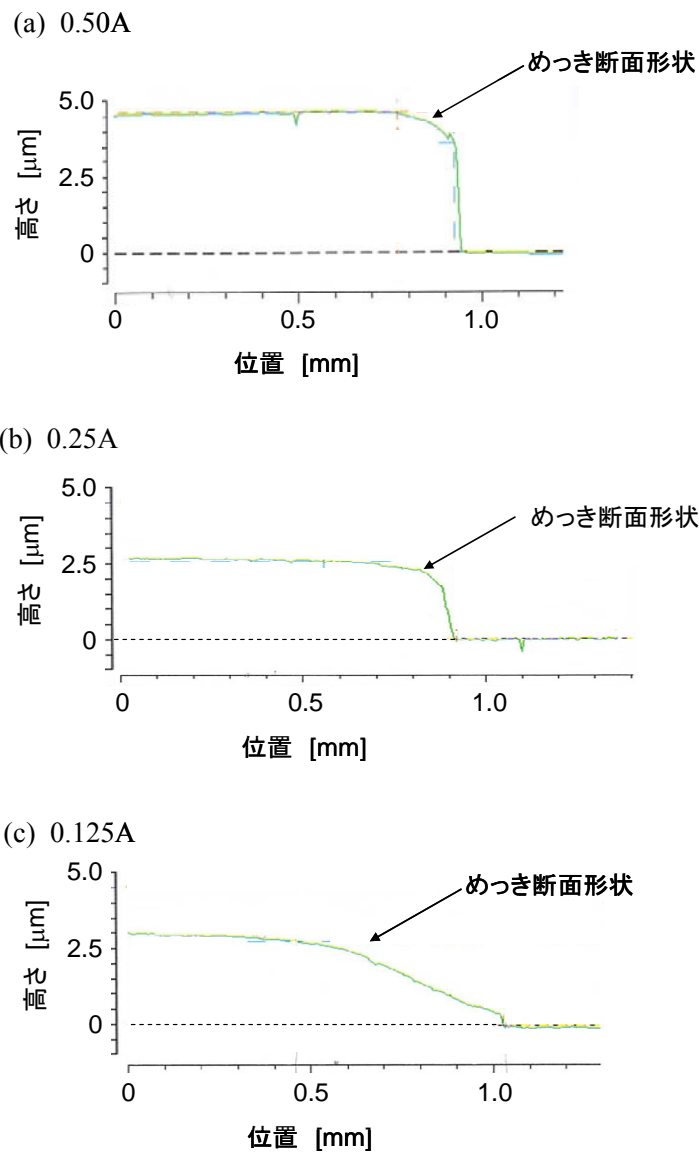


図 4.7 めっき端部の形状に及ぼす電流値の影響

4.3 曲面マルチレベル CGH の製作

マスクめっき法の手法により，曲面マルチレベル CGH を製作した．製作した CGH を図 4.8 に示す．ここでは，CGH 製作時の 3 回のめっき工程ごとに 3 次元構造解析顕微鏡 (Zygo 社 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 4.1 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 0.03~0.06 μm であった．表には，比較のために表 3.2 の平面マルチレベル CGH の標準偏差も示している．3 回行ったいずれのめっきでもばらつきが改善されており，良好な結果が得られた．

3.1 節のシミュレーションから，めっき厚さのずれは 0 次光強度に，めっき厚さのばらつきは回折効率に影響することがわかっているが，めっき厚さのずれが 0.1 μm の場合，0 次光強度は設計値の約 1.5 倍であり，めっき厚さのばらつきが 0.1 μm の場合，効率の低下は 1%以下にしかならず，強度分布整形の結果にはほとんど影響しない．

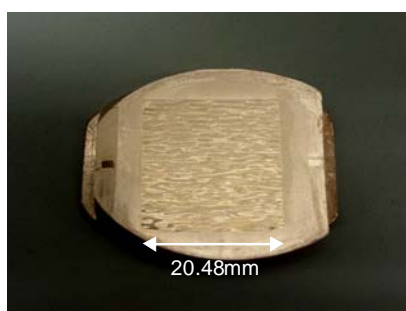


図 4.8 製作した曲面マルチレベル CGH

表 4.1 CGH 表面形状測定結果[μm]

	めっき工程		
	1 回目	2 回目	3 回目
高さの設計値 [μm]	3.75	1.88	0.94
測定高さの平均値 [μm]	3.81	1.80	0.91
測定高さの最大値 [μm]	3.88	1.90	0.99
測定高さの最小値 [μm]	3.71	1.70	0.88
標準偏差 [μm]	0.05	0.06	0.03
標準偏差[μm] (表 3.2)	0.17	0.17	0.06

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 0.5~1mm 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 4.2 に示す．めっきを行っていない元の基板面は 0.038 μmRa であるが，めっきを行った面は 0.09~0.15 μmRa 程度であった．表 4.2 には表 3.1 に示す平面マルチレベル CGH の結果も示しているが，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やめっき条件の最適化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．

表 4.2 各レベルにおける表面粗さ

レベル (めっき回数)	表面粗さ Ra [μm]	表面粗さ (表 3.1) Ra [μm]
0 (0)	0.038	0.037
1 (1)	0.151	0.036
2 (1)	0.124	0.042
3 (2)	0.146	0.172
4 (1)	0.091	0.053
5 (2)	0.148	0.225
6 (2)	0.149	0.173
7 (3)	0.157	0.391

4.4 低出力炭酸ガスレーザーを用いた強度分布整形実験

最大出力 10W の炭酸ガスレーザー (SYNRAD 社 48-1W) を用いて、製作した曲面マルチレベル CGH によるレーザー光強度分布整形実験を行った。実験方法は 2.6 節で述べた方法と同じである。整形されたレーザー光の観察画像を図 4.9 に示す。目標とする強度分布とほぼ同じ大きさの 1mm×4mm の矩形の強度分布に整形することができた。しかし、図 3.9 の平面マルチレベルの場合と同様に強度むらが見られる。この原因については、今後、さらに検討する必要がある。

回折効率を 3.1 節と同様に定義して、その値を調べたところ 67.8%であった。3.1 節の平面マルチレベル CGH の場合は 69.2%であり、同程度の回折効率を得られている。

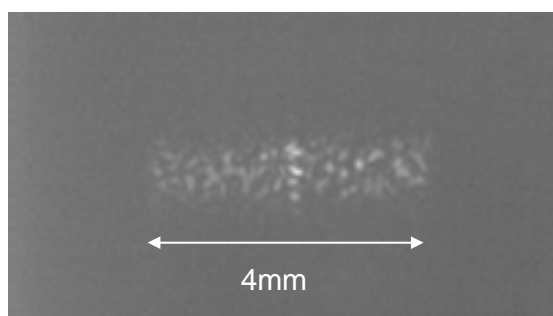


図 4.9 曲面マルチレベル CGH を用いたレーザー光強度分布整形結果

4.5 鉄鋼材料の溶融に及ぼす強度分布整形の効果

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 (川崎重工業社, AF-5L) に搭載し、鉄鋼材料の溶融実験を行った。用いたレーザー加工機の最大出力は 5kW で、CGH に入射するレーザー光の径は $\phi 14\text{mm}$ である。また、入射するレーザー光の強度分布は図 3.17 に示したようにガウス分布が乱れたものになっている。整形したレーザー光を鉄鋼材料に照射しながら、試料を移動させ、溶融特性を調べた。

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表面にブラスト処理を施した後、アセトンで洗浄した。

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、レーザービームアナライザー（Prometec 社、Laser Scope UFF100）を用いて、整形したレーザー光の強度分布を測定した。強度分布の測定結果を図 4.10 に示す。図 4.10 (a) は二次元強度分布、図 4.10 (b), (c) は、図 4.10 (a) の赤い線（強度分布の中心を含む線）上における強度分布であり、それぞれ均一強度分布方向とガウス分布方向である。整形されたレーザー光強度分布は不均一であり、大きさも目標とする分布より大きくなっているが、形状は矩形に整形することができた。

低出力レーザーを用いた場合には、整形されたレーザー光の大きさは、目標とする強度分布とほぼ同じ大きさであったことおよび図 4.10 の強度分布は、図 3.17 に示した平面マルチレベル CGH を用いて高出力炭酸ガスレーザーの強度分布整形を行った結果とよく似ていることから、高出力レーザーの強度分布整形を行った場合の強度分布の目標からのずれは、CGH 以外に原因があると考えられる。

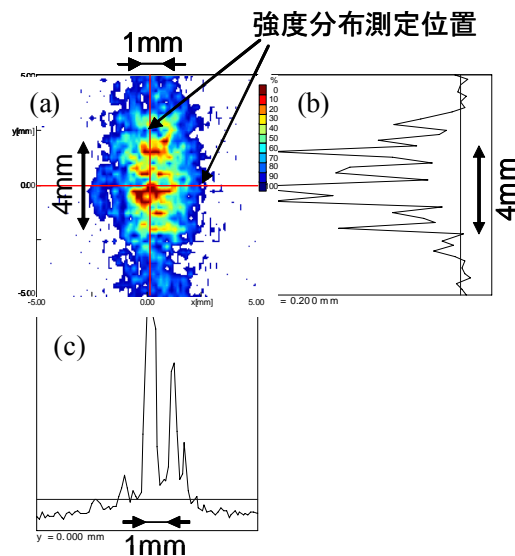


図 4.10 整形した高出力レーザー光の強度分布 (a)強度分布二次元表示, (b)均一強度方向, (c)ガウス分布方向

整形されたレーザー光を照射しながら試料を移動させ、試料の熔融状態を調べた。試料の移動方向は整形したレーザー光の均一強度（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、この加工機に標準で搭載されているレンズを用いた光学系で同様の実験を行った。レーザー光の照射幅を整形したレーザー光と等しくするために、試料を焦点位置からデフォーカスしてスポット径を 4mm にした。

図 4.11 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 4.1 (a)は CGH を用いて整形したレーザー光を照射した結果，図 4.11 (b)はデフォーカスさせたレーザー光を照射した結果である．図の白い部分が熔融した領域である．試料の熔融幅にはあまり差がないが，整形したレーザー光の方が熔融深さが浅くなっており，広く浅い熔融形状が得られている．この熔融形状は，整形したレーザー光の場合，各位置において照射されたエネルギー密度が，より均一なことをよく反映している．また，整形したレーザー光の方が熔融深さが浅くなっている原因については，詳細な検討を行う必要がある．

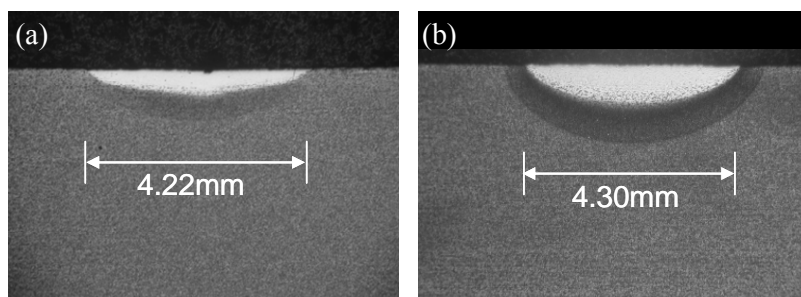


図 4.11 レーザ光を照射した試料の断面マクロ写真
(a)整形したレーザー光，(b)デフォーカスさせたレーザー光
試料 合金工具鋼 SKD11，レーザーパワー1.5kW，試料移動速度 5mm/s

図 4.12 に，整形したレーザー光(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)とデフォーカスさせたレーザー光(φ4mm，レーザーパワー1.5kW，図中ではレンズと表記)を照射した場合の試料の移動速度と熔融幅，熔融深さの関係を調べた結果を示す．ここで熔融深さは熔融部の最大深さとし，熔融幅は試料表面での熔融幅とした．熔融幅は整形したレーザー光の場合，移動速度が小さい条件で，4.2mm 程度である．これは整形したレーザー光の幅が 4mm よりやや大きいことを反映している．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，熔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，レーザー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，それぞれ熔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(レーザーパワー/移動速度)は，ほぼ等しい値をとる．従って，整形したレーザー光では，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，レーザー光の幅とほぼ等しい熔融幅を得ることができる．一方，デフォーカスさせたレーザー光の場合，熔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，整形したレーザー光とは異なる傾向を示した．また，ある速度以上では熔融幅の減少の傾きが小さくなっている．

熔融深さについては，整形したレーザー光の場合，熔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．一方，デフォーカスさせたレーザー光の場合でも，同様の傾向が見られた．従って，どちらの強度分布を用いても，移動速度によって熔融深さを制御することができる．

以上の実験結果から，整形したレーザー光を用いると，ある速度以下で試料を移動させることで強度分布の幅に等しい熔融幅を安定して得ることが可能であり，移動速度によって熔融深さも制御することができ，所望する熔融形状を得ることが容易である．一方，デフォーカスさせたレーザー光の場合は，移動速度によって熔融幅と深さが変化するので，所望する熔融形状を得ることは容易でない．

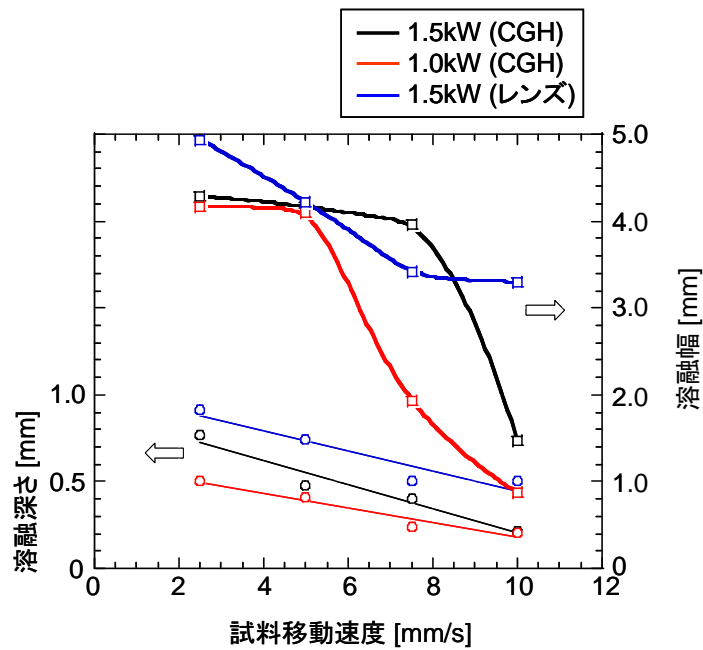


図 4.12 レーザ光強度分布と溶融形状の関係

4.6 まとめ

本章では、銅の放物面鏡上にマルチレベルの凹凸構造を形成することで、集光機能と強度分布整形機能を併せ持つ高出力炭酸ガスレーザー用の曲面マルチレベルCGHを製作した。製作にあたっては、第2章で述べた曲面上に描画できるよう改造し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た。めっき条件を最適化することにより、めっき厚さのばらつきの標準偏差を $0.03\sim 0.06\mu\text{m}$ に抑えることができた。製作したCGHを用いて低出力の炭酸ガスレーザー光の強度分布を整形した結果、目標とする強度分布とほぼ同じ大きさの $1\text{mm}\times 4\text{mm}$ の矩形形状の強度分布に整形することができた。回折効率は約68%であり、平面マルチレベルの場合と同程度の値であった。

また、CGHを高出力炭酸ガスレーザー加工機に搭載し、整形したレーザー光を鉄鋼材料に照射して表面溶融特性を調べた結果、一般の加工に用いられる強度分布の場合とは異なる溶融特性を示し、強度分布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。

第5章 高出力半導体レーザー用 CGH

本章では、高出力半導体レーザーを光源とした鉄鋼材料のレーザー焼入れにおける CGH の設計と試作に取り組んだ。具体的には CGH を用いてレーザー光強度分布を整形することによって、レーザー焼入れで形成される硬化部の深さ分布の均一性の向上を目指した。とくに高出力半導体レーザー光が、光ファイバで伝送される系について考える。

CGH を利用したレーザー焼入れに関する研究は複数[14, 15, 18, 21]報告されているが、いずれもレーザー光強度分布の設計方法について触れられていない。本研究では、はじめに熱解析シミュレーションを利用して、硬化部の深さ分布を均一にするレーザー光強度分布を求めた。次に、その強度分布を実現するための CGH の設計方法と具体的な設計結果を示す。そして、石英基板上に CGH を製作し、実際に整形したレーザー光を使って鉄鋼材料の焼入れを行い、その効果を確かめた。

5.1 硬化部の深さ分布を均一にするレーザー光強度分布の検討

5.1.1 レーザー光吸収率の見積もり

硬化部の深さ分布を均一にするレーザー光強度分布を検討するために、本研究では熱解析シミュレーションを用いる。この熱解析シミュレーションには試料のレーザー光吸収率の値が必要である。そこで、はじめに高出力半導体レーザーを用いて焼入れ実験を行い、実験で得られた硬化部の断面形状と熱解析シミュレーション結果を比較することで、吸収率を見積もった。

レーザー焼入れ実験の概略を図 5.1 に示す。レーザーには高出力半導体レーザー (Laserline 社, LDL160-1000) を用いた。レーザー光には波長 808nm と 940nm の 2 つの波長の光が含まれており、コア径 1mm の光ファイバで伝送される。レーザー光は光ファイバから出力された後、レンズにより集光される。光ファイバから出力後のレーザー光強度は最大 720W である。

試料をレンズ 2 の焦点位置から外れた位置に設置し、試料を移動させながらレーザー光を照射する。レンズ 2 の焦点位置と試料表面間の距離をデフォーカス量と呼び、 D_f で表す。レーザーパワーを 720W, D_f を 15mm, 試料の移動速度を 5.0~15.0mm/s としてレーザー焼入れ実験を行った。このときのレーザー光強度分布を図 5.2 に示す。強度分布は中央が強く、長径約 4.5mm, 短径約 1.5mm の楕円状の分布をしている。実験では図の x 軸方向に試料を移動させた。

試料は炭素鋼 S45C とした。試料の化学成分を表 5.1 に示す。試料はレーザー焼入れを行う前に表 5.2 に示す条件で焼ならし、焼入れ、焼戻し処理を行い、ソルバイト組織とした。試料の大きさは 60×40mm, 厚さ 11mm で、試料表面は平面研削盤により研削した面とし、レーザー光の吸収剤は塗布しなかった。

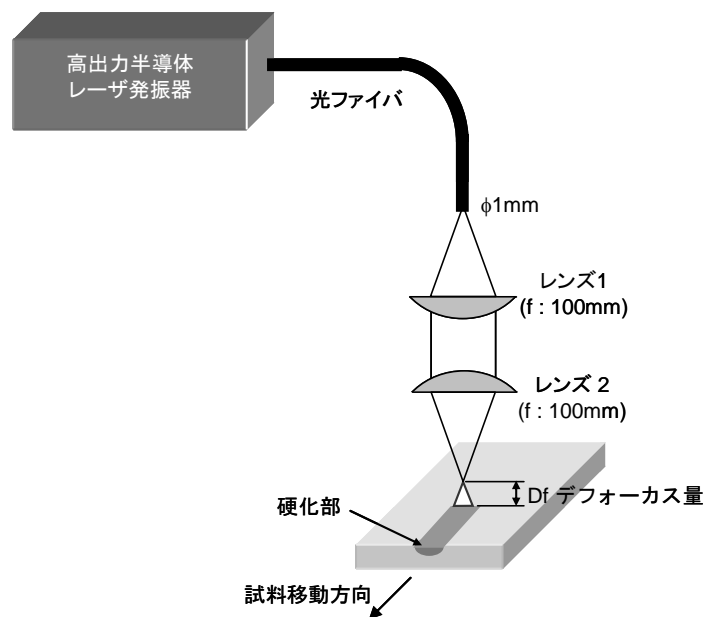


図 5.1 レーザ焼入れ実験の概略図

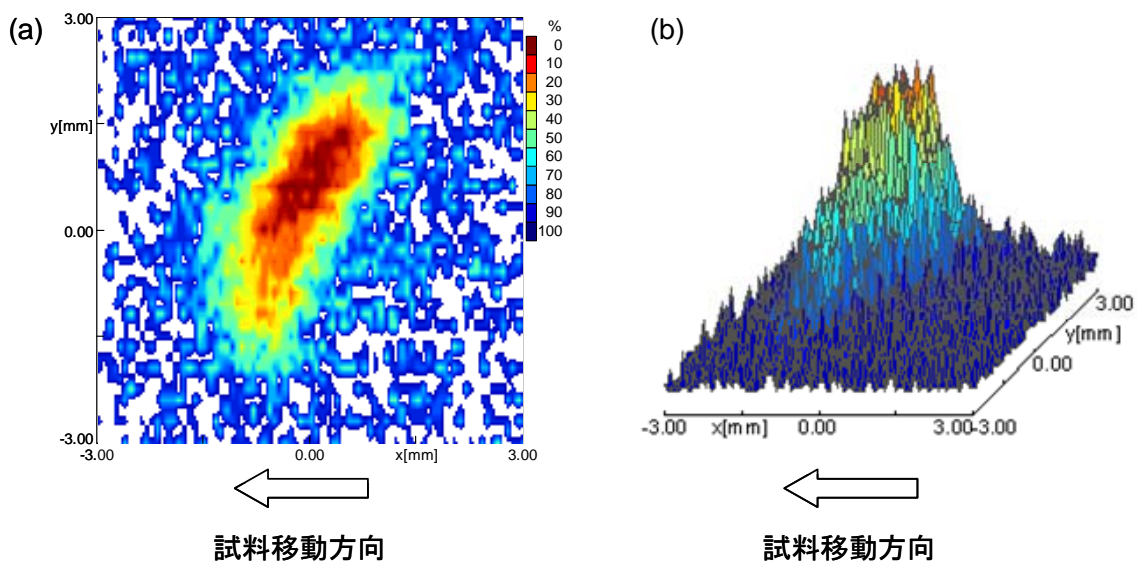


図 5.2 Df=15mm でのレーザー光強度分布
(a)二次元表示, (b)三次元表示

表 5.1 試料の化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S
0.48	0.28	0.78	0.016	0.025

表 5.2 試料のレーザー焼入れ前の熱処理条件 (JIS G 4051 に準拠)

焼ならし	焼入れ	焼戻し	焼戻し後の平均硬さ
845℃ 30分保持 空冷	850℃ 30分保持 水冷	600℃ 60分保持 水冷	262.7HV

焼入れを行った試料は硬化領域を測定するため、試料を移動方向に対して垂直に切断し、樹脂（フェノールブラック）に埋め込んで研磨した後、3%ナイトル液でエッチングした。焼入れを行った試料の断面写真の例を図 5.3 に示す。皿状に色が濃くなっている領域が硬化部であり、硬化部の深さの最大値を硬化深さ、硬化部表面の幅を硬化幅と呼ぶ。試料移動速度と硬化深さ、硬化幅の関係を図 5.4 に示す。移動速度が増加するにつれて硬化深さ、硬化幅ともに減少しているのが分かる。この硬化形状の測定結果から熱解析シミュレーションを利用してレーザー光の吸収率を見積もる。

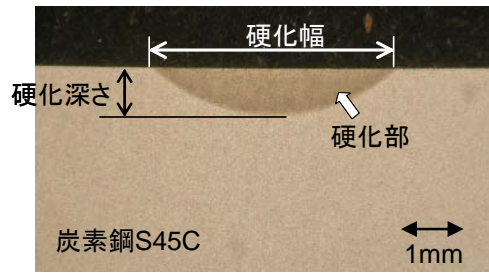


図 5.3 レーザ焼入れ試料断面写真例
レーザーパワー720W, Df=15mm, 試料移動速度 8mm/s

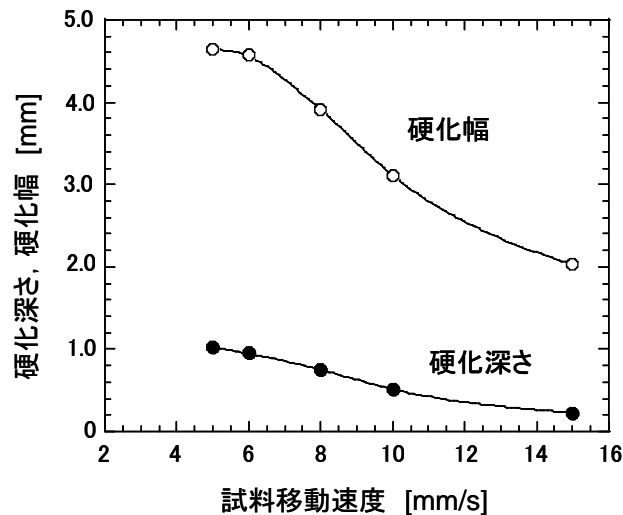


図 5.4 試料移動速度と硬化形状の関係
レーザーパワー720W, Df=15mm

熱解析には汎用有限要素法解析ソフト ANSYS を用いた。解析は線形定常伝熱解析とし、熱源を熱流束で試料表面に与えながら、試料を一定速度で移動させた。図 5.5 に解析モデルを示す。図の x 方向に試料を移動させた。試料モデルの大きさは実験と同じになるよう x 方向の長さを 60mm, y 方向には左右対称なので 1/2 のモデルとし、長さは 20mm とした。試料の厚さは 11mm とした。境界条件は、レーザー光照射面のみ熱伝達率を $0.01\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ として大気中への熱の流出を考慮し、それ以外の面は熱の授受のない断熱面とした。また雰囲気温度は 25°C とした。

比熱や熱伝導率などの物性値には温度依存性がある。牧之内らは、同じ S45C 材を用いて物性値の温度依存性を考慮した場合の硬化部形状、および、温度依存性を考慮せず、室温から融点までの平均値を用いた場合の硬化部形状をそれぞれ計算して比較を行い、形状の差が小さいことを示している[51]。そこで本研究では簡単のために物性値の温度依存性を考慮せず、牧乃内らが用いた以下の値を用いて、熱解析を行った。

熱伝導率： $K=28.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ （室温から融点までの平均値）

熱拡散率： $a=5.52\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ （室温から融点までの平均値）

比熱： $C=720\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ （室温から融点までの平均値）

密度： $\rho=K/(a\cdot C)=7121\text{kg}/\text{m}^3$ 熱伝導率，熱拡散率，比熱から計算

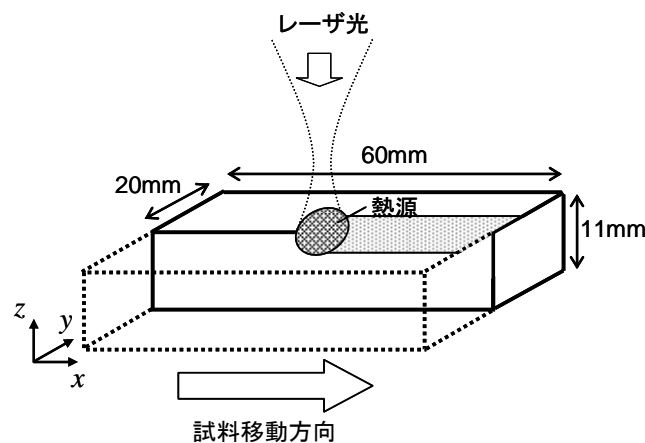


図 5.5 熱解析モデル

熱源形状は図 5.2 の強度分布測定結果を参考に、試料移動方向に 1.5mm, 試料移動方向と直角方向に 4.5mm の幅を持つガウス分布とし、図 5.6 に示すようにそれぞれの方向で 6 分割して近似した。熱解析による温度分布の計算結果の一例を図 5.7 に示す。硬化部の領域は、牧之内らの解析と同じように、最高到達温度が 880°C 以上になった領域とした。試料のレーザー光吸収率の見積もりにあたっては、レーザーパワー 720W, 試料移動速度 8mm/s として、吸収率を変化させて硬化深さを計算し、実験結果（硬化深さ 0.75mm）に合う吸収率を求めた。硬化深さの計算結果を図 5.8 に示す。吸収率が 43.5% の場合、実験結果と一致した。また、このときの硬化幅は 3.66mm であり、実験値の 3.91mm とよく一致している。以上の結果から、吸収率を 43.5% とした。

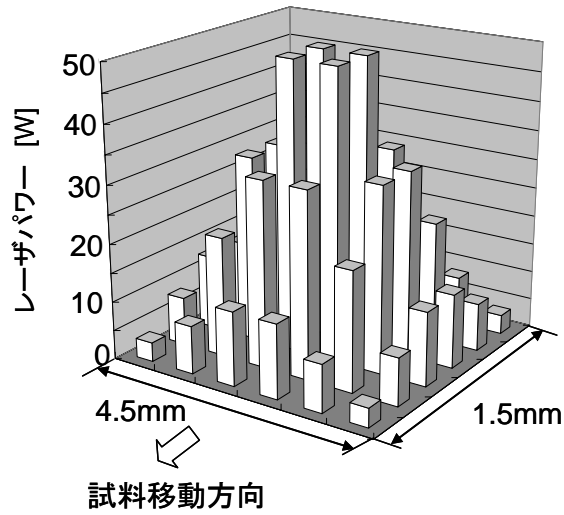


図 5.6 熱源形状

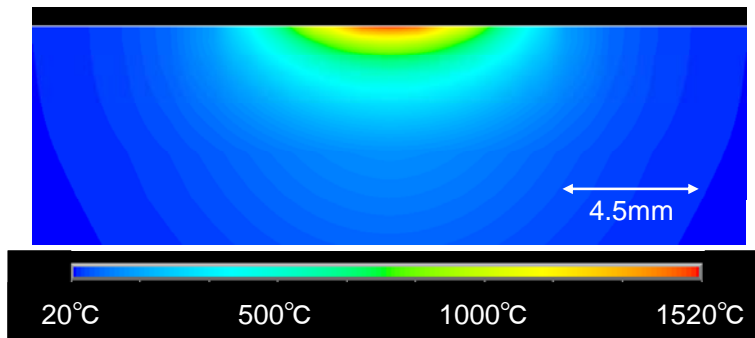


図 5.7 熱解析シミュレーション例（試料移動方向に垂直な断面の温度分布）

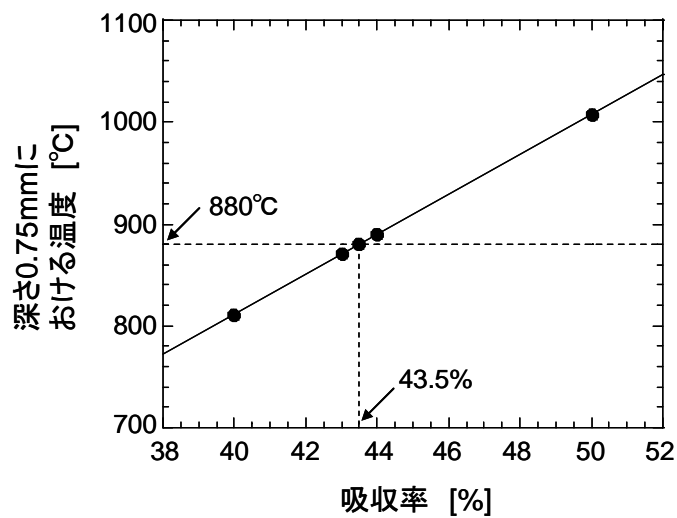


図 5.8 吸収率と深さ 0.75mm における温度との関係

レーザー光の吸収率を 43.5%として、試料移動速度を変えたときの硬化深さと硬化幅の計算結果と実験結果を図 5.9 に示す。硬化幅に関しては、8mm/s 以外ではよい一致はみられない。これは物性値の温度依存性を考慮していないことなどが原因として考えられる。より精度の高い熱解析については今後の検討課題である。

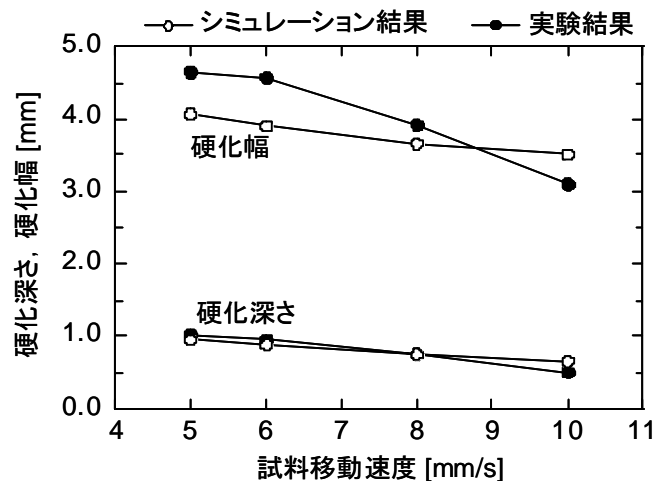


図 5.9 試料移動速度と硬化深さ，硬化幅の関係

5.1.2 光ファイバで伝送されたレーザー光用 CGH の設計方法

CGH を適用したレーザー焼入れ実験装置の模式図を図 5.10 に示す。レンズ 1 とレンズ 2 の間に CGH を組み込み、試料表面がレンズの焦点位置に一致するように試料を設置する。レーザー光は、この焦点位置で目標とする強度分布に整形される。本研究で用いた高出力半導体レーザーは波長 808nm と 940nm のレーザー光が含まれているが、CGH を用いる場合には波長 808nm の光だけを利用し、波長 940nm の光は波長選択フィルタで除去した。これは波長によって回折パターンの大きさが異なること、および必要な CGH の凹凸段差が異なるためである。なお、図では波長選択フィルタを省略している。波長 808nm のレーザー光は石英を透過するため、CGH は石英を基板とする透過型とした。試料は厚さ 10mm の炭素鋼 S45C の平板とし、試料表面に幅 4mm 程度で均一な深さ分布を持つ硬化部を得ることを目標とした。

光ファイバからの出力光は、通常の CGH に利用されるコヒーレント光ではない。本研究で用いた高出力半導体レーザーは 3 つのスタック（半導体レーザー素子の集まり）で構成されており、波長 808nm のスタックが 2 個、波長 940nm のスタックが 1 個である。前述したとおり、波長 808nm の光だけを利用するが、光ファイバから出力される光は数 100 個の半導体レーザー素子からの光が集められたものであり、これらの光は互いに位相の相関関係がない。また、レーザー光は、波長に対して十分大きなコア径を持つ光ファイバ内を全反射を繰り返して通過する。従って、光ファイバの射出端面から出力される光波は、空間的にインコヒーレントな光になる。ここでは、光源を光ファイバの射出端面の全面に、互いに位相相関のない点光源が多数配置されたものとして扱う。それら各点光源から出力される光の集まりが CGH に入射すると考えると、CGH により整形される強度分布は各点光源が作り出すレーザー光強度分布を足し合わせたものになる。

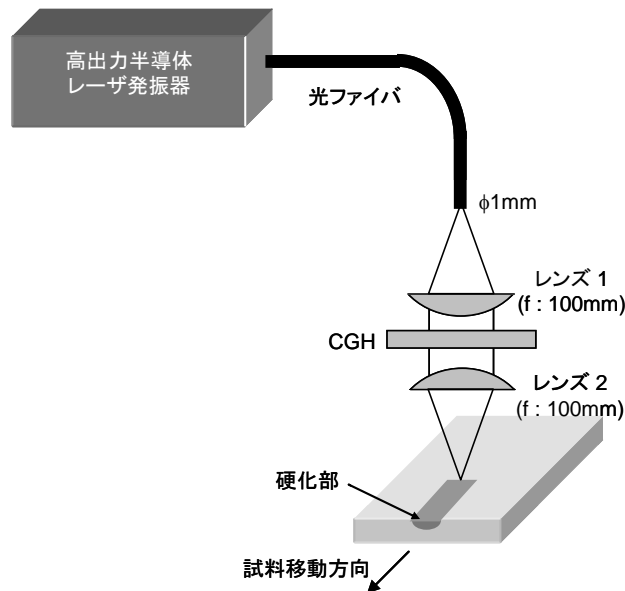


図 5.10 CGH を利用したレーザー焼入れ実験装置の模式図

図 5.10 の光学系で CGH がいない場合のレンズ 2 の焦点位置での強度分布を $C(x, y)$ とし、点光源からのコヒーレント光を CGH で整形した場合の強度分布を $D(x, y)$ とする。試料表面上での整形された強度分布 $I(x, y)$ は、 $C(x, y)$ と $D(x, y)$ の畳み込み積分

$$I(x, y) = \iint D(X, Y) \cdot C(x - X, y - Y) dXdY \quad , \quad (5.1)$$

と表すことができる。従って、CGH によって整形されるレーザー光は強度分布 $C(x, y)$ より細かな分布を表現することはできない。

図 5.10 に示すレンズ 1 とレンズ 2 の焦点距離が等しい場合、 $C(x, y)$ は、光ファイバのコア径に等しい直径 1mm の大きさであり、次式で表される。

$$C(x, y) = \begin{cases} I_0 & : \sqrt{x^2 + y^2} \leq 0.5\text{mm} \\ 0 & : \sqrt{x^2 + y^2} > 0.5\text{mm} \end{cases} \quad . \quad (5.2)$$

$C(x, y)$ の分布を図 5.11(a) に示す。光ファイバ端面の点光源からのコヒーレント光を整形した強度分布 $D(x, y)$ は、図 5.11(b) に示すような M 字分布とした。この $D(x, y)$ は、ディラックのデルタ関数を用いて、

$$D(x, y) = \begin{cases} \delta(x) \cdot \left(\frac{a}{2}y + b \right) & : |y| \leq 2\text{mm} \\ 0 & : |y| > 2\text{mm} \end{cases} \quad , \quad (5.3)$$

と表される。ここで図 5.11(b) に示す M 字分布の中心強度 b と両端の強度 $a+b$ の比 $(a+b)/b$ を強度比と呼ぶ。図 5.11(c) は、 $C(x, y)$ と $D(x, y)$ を (5.1) 式の畳み込み積分に代入して求めた試料面上の強度分布 $I(x, y)$ である。レーザー光は x 方向に移動させるが、この分布は両端の強度が高いために、レーザー光の端の位置での熱拡散による温度の低下を補うことが期待できる。

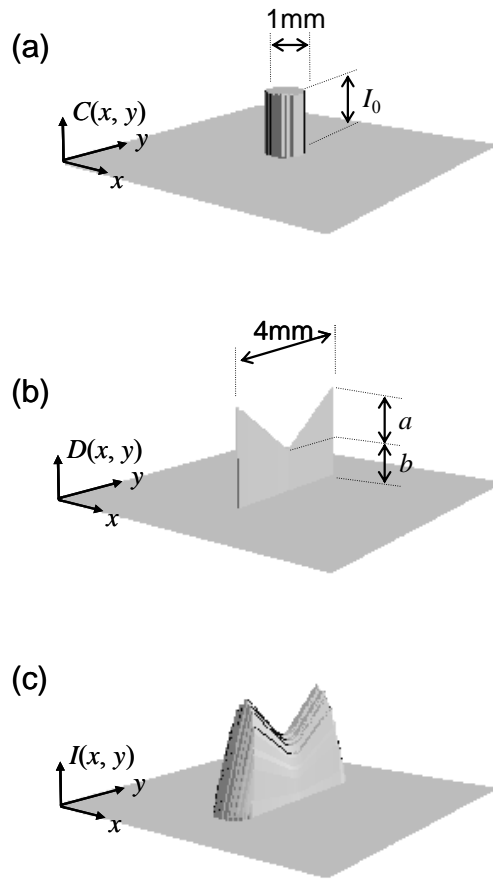


図 5.11 レンズ 2 の焦点面における強度分布の計算例 (a)CGH がいない場合の強度分布 $C(x, y)$, (b)M 字強度分布 $D(x, y)$, (c)整形された強度分布 $I(x, y)$

最適なレーザ光強度分布を決定するために、はじめに強度比 $(a+b)/b$ を与えて $I(x, y)$ を求め、それを熱源とした熱解析によって試料内の温度分布を計算し、硬化部の形状を求める。強度比を変えながら硬化部の深さ分布が最も均一になる $D(x, y)$ を決定する。CGH は、この $D(x, y)$ を実現するように設計する。試料内の温度分布の計算にあたっては、試料に照射されるレーザパワーを 480W、レーザ光の吸収率を 5.1.1 節で求めた 43.5% とした。従って試料が吸収するレーザパワーは 208.8W になる。M 字分布の強度比が変わってもこの値は一定とした。試料移動速度は 5mm/s とした。強度比を変えて硬化部の断面形状を計算した結果を図 5.12 に示す。強度比が大きくなるにつれて硬化部中心の硬化深さが浅くなっている。強度比が 2.0 の場合、硬化深さの均一性が高く、強度比が 4.0 になると、中心の硬化深さが浅くなりすぎ、硬化深さの均一性が低下している。

ここで硬化深さの均一性を表すために、図 5.13(a) に示すように硬化形状の $W_{0.9}$ を最大硬化深さの 90% の深さでの硬化幅、 W_s を試料表面の硬化幅として、平坦度を次のように定義する。

$$F = \frac{W_{0.9}}{W_s} \quad (5.4)$$

図 5.13(b) に強度比と平坦度の関係を示す。強度比が大きくなるにつれて平坦度が大きくなっているが、強度比が 2.5 以上になると急激に小さくなる。これは硬化部中心の硬化深さが最大深さの 90% よりも浅くなっているためである。以上の結果から、強度比 2.0 の M 字分布に整形する CGH を製作することとした。

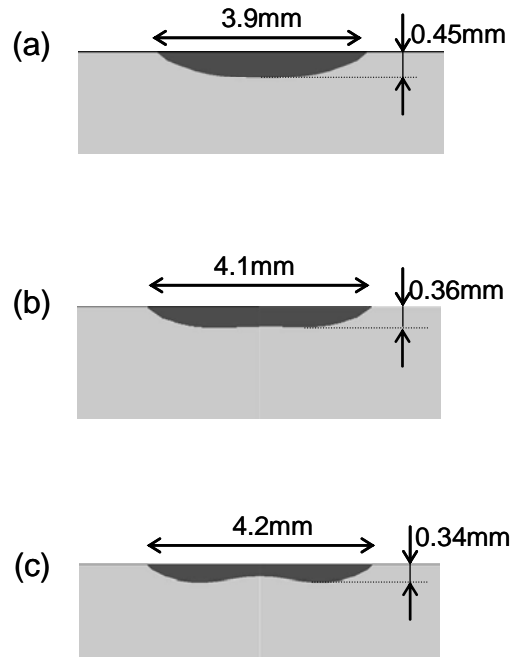


図 5.12 硬化部の断面形状計算結果 (a)強度比 1.0, (b)強度比 2.0, (c)強度比 4.0
照射レーザーパワー480W, レーザ光吸収率 43.5%, 試料移動速度 5mm/s

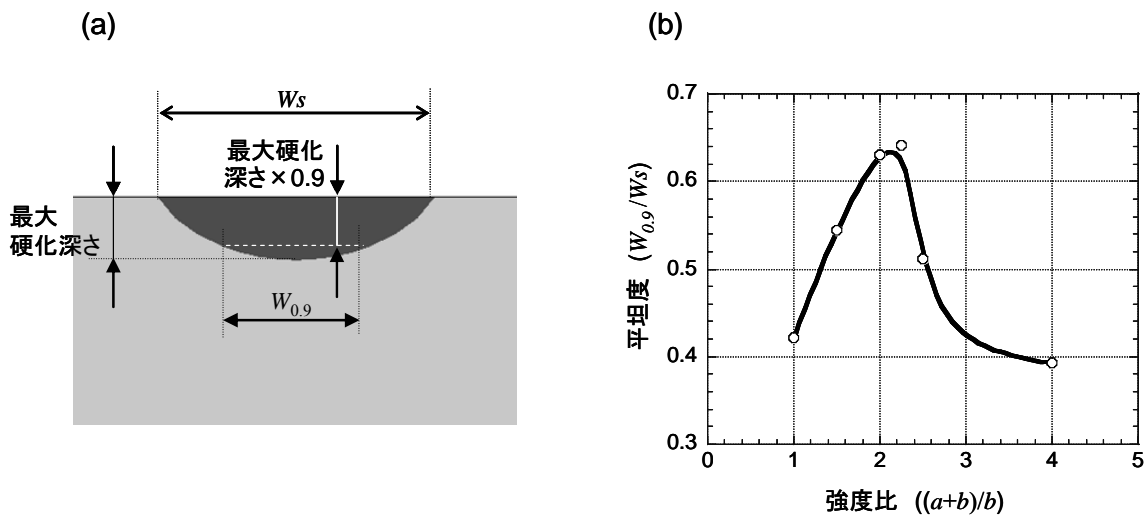


図 5.13 強度比と平坦度の関係
照射レーザーパワー480W, レーザ光吸収率 43.5%, 試料移動速度 5mm/s

5.2 CGH の設計

CGH は透過型とし、素材を石英とした。前章と同様に、ピクセルサイズを $d \times d$ とし、ピクセル数を $N \times N$ とすると、この場合、整形できる強度分布の大きさは、大きさが $\lambda f/d \times \lambda f/d$ で表される正方形よりも小さくする必要があり、これよりも大きい強度分布には整形することができない[付録]. ただし、 λ はレーザー光の波長、 f はレンズ 2 の焦点距離である。 $\lambda=808\text{nm}$, $f=100\text{mm}$ の場合、レーザー光を 4mm 程度の強度分布に整形するには d を約 $20\mu\text{m}$ 以下にする必要がある。また、CGH 製作上のデータ数の制約から、 N は 512 以下にする必要があった。よって、CGH パターンの大きさは最大 $10.3\text{mm} \times 10.3\text{mm}$ になる。しかし、本研究で用いたレーザー加工機の場合、CGH への入射光の直径は約 34mm である。そ

ここで図 5.14 に示すように、同一の CGH パターンを $M \times M$ 個並べて、直径 34mm のレーザー光を全てカバーするような CGH を設計した。 $M \times M$ 個の各パターンをサブプログラムと呼ぶ。このような形状の CGH の場合、整形できる強度分布の細かさには劣るが、回折パターンが入射レーザー光の強度分布の不均一に影響されにくいという利点がある[14].

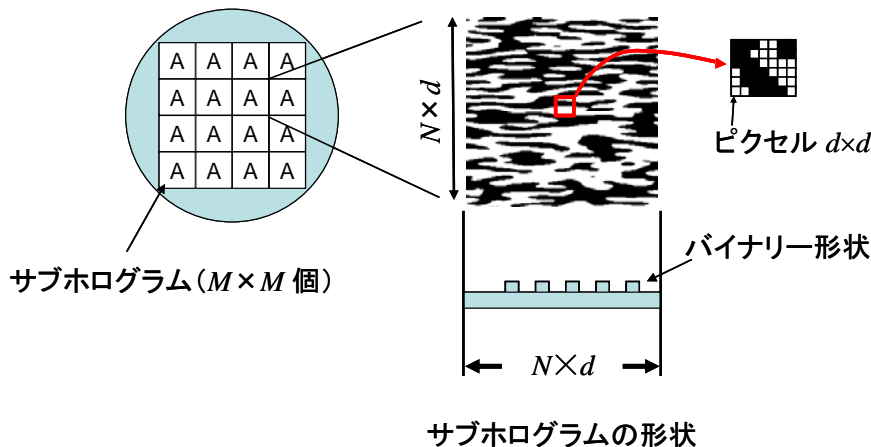


図 5.14 CGH の模式図

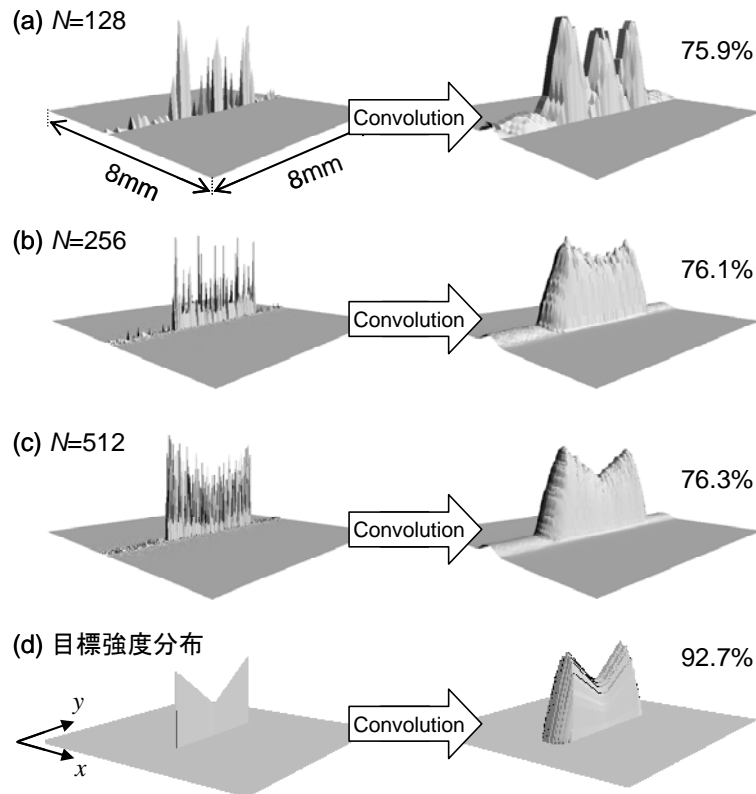
次にサブプログラムパターン数 M とピクセル数 N を決定する。サブプログラムパターンの設計は、サブプログラムに点光源から出力された均一な強度のコヒーレントなレーザー光が入射し、強度比 2.0 の M 字分布に整形するように行った。パターンの設計には GS 法[48]を用いた。製作上の容易さから CGH の凹凸形状はバイナリー形状とした。

ピクセルサイズ d を $6\mu\text{m}$ とし、ピクセル数 N の値が $N=128, 256, 512$ の条件でサブプログラムパターンの設計を行った。CGH パターン全体の大きさを $49.152\text{mm} \times 49.152\text{mm}$ とすると、 M の値はそれぞれ $M=64, 32, 16$ になる。計算条件を表 5.3 にまとめる。図 5.15 の左側は、設計したそれぞれのサブプログラムパターンで得られる点光源に対する強度分布 $D(x, y)$ を表し、右側は試料上の強度分布 $I(x, y)$ を表している。また、図 5.15(d) は目標とした強度分布（強度比 2.0）である。点光源に対する強度分布は針状の分布を持つが、畳み込み積分を行うことによって強度分布はなめらかになっている。回折効率を、CGH に入射したレーザー光強度に対する整形された強度分布 $1\text{mm} \times 4\text{mm}$ 内のレーザー光強度と定義した場合、それぞれ 75.9% ($N=128$)、76.1% ($N=256$)、76.3% ($N=512$) となり、CGH の設定条件による違いは大きくなかった。また、 $N=128$ および $N=256$ の場合の整形された強度分布は理想的な強度分布と大きく異なっているが、 $N=512$ の場合の強度分布は比較的良好に一致している。そこで、CGH パターンの設計は表 5.3 の No.3 の条件 ($N=512, M=16$) で行うこととした。

表 5.3 CGH パターン設計条件

条件番号	d [μm]	N	サブプログラムの大きさ ($d \cdot N$) \times ($d \cdot N$)	M	CGH の大きさ ($d \cdot N \cdot M$) \times ($d \cdot N \cdot M$)
No.1	6	128	0.768mm \times 0.768mm	64	49.152mm \times 49.152mm
No.2	6	256	1.536mm \times 1.536mm	32	49.152mm \times 49.152mm
No.3	6	512	3.072mm \times 3.072mm	16	49.152mm \times 49.152mm

しかし，図 5.15(c)の強度分布 $I(x, y)$ には，長手方向のすそにも光強度が現れており，効率低下の要因になっている．サブプログラムパターン設計の目標とした点光源に対する M 字強度分布は， x 軸方向には δ 関数であり， y 軸方向にはステップ状の分布である．しかし，この分布を限られたピクセル数のサブプログラムで実現することは難しい．そのため， y 軸方向に不要な強度分布（以下，不要強度）が発生している．そこで，目標とする点光源に対する M 字分布の x 軸方向の強度分布を， δ 関数ではなく，幅を持つ分布として設計することで，不要強度の低減をはかった．図 5.16 に x 軸方向の強度幅をそれぞれ 0.5mm, 1.0mm とした場合の強度分布 $I(x, y)$ の結果を示す．不要強度が小さくなっていることがわかる．



点光源に対する強度分布 $D(x, y)$ 試料上の強度分布 $I(x, y)$

図 5.15 設計したサブプログラムによる強度分布整形結果

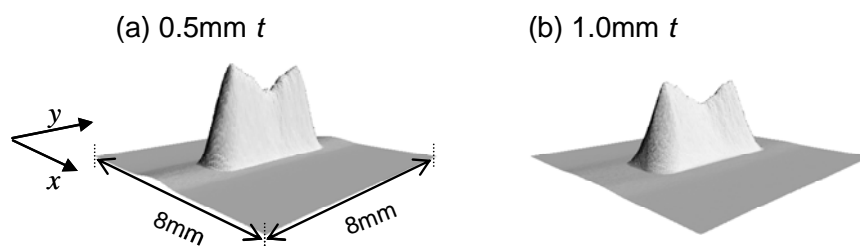


図 5.16 M 字分布の x 軸方向に強度幅を与えた場合の試料上の強度分布 $I(x, y)$ の計算結果 (a)強度幅 0.5mm, (b)強度幅 1.0mm

点光源に対する M 字分布の x 軸方向の強度幅を 0.1 から 1.0mm として、設計を行ったときの $I(x, y)$ の断面強度分布を図 5.17 に示す．今回の計算条件では幅が 0.1mm の場合が図 5.15(c) の δ 関数の場合に相当している．強度幅を大きくするにつれて不要強度も小さくなっているが、強度幅が 1.0mm の場合、強度分布が x 軸方向に広がったために、強度も大きく低下している．一方、0.5mm の場合は不要強度の大きさが約半分になるのに対して M 字分布の最大強度がわずかに低下しているだけである．

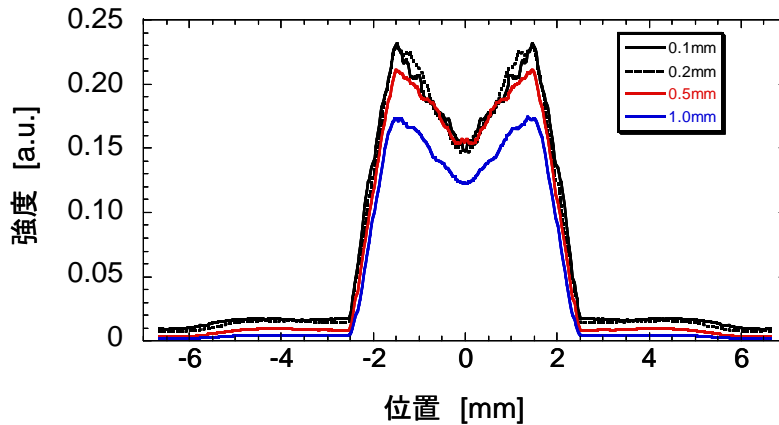


図 5.17 x 軸方向の強度幅と整形された M 字分布の断面強度分布の関係

以上の結果より、点光源に対する M 字分布の強度比 $(a+b)/b$ を 2.0、 x 軸方向の強度幅を 0.5mm とし、ピクセル数 $N \times N = 512 \times 512$ でサブホログラムパターンを設計を行った．また、CGH を構成するサブホログラムの数は、 $M \times M = 16 \times 16$ とした．設計したサブホログラムパターンで得られる光強度分布を図 5.18(a) に、この強度分布でレーザ焼入れを行った場合の硬化部の断面形状の計算結果を図 5.18(b) に示す．ただし、照射レーザパワーを 720W、吸収率を 43.5%、試料移動速度を 5mm/s とした．硬化部の硬化幅と硬化深さはそれぞれ 3.87mm と 0.32mm である．平坦度は 58.9% であり、理想強度分布 (図 5.12(b)) の場合の 63.1% よりわずかに小さいだけであり、良好な結果が得られる．

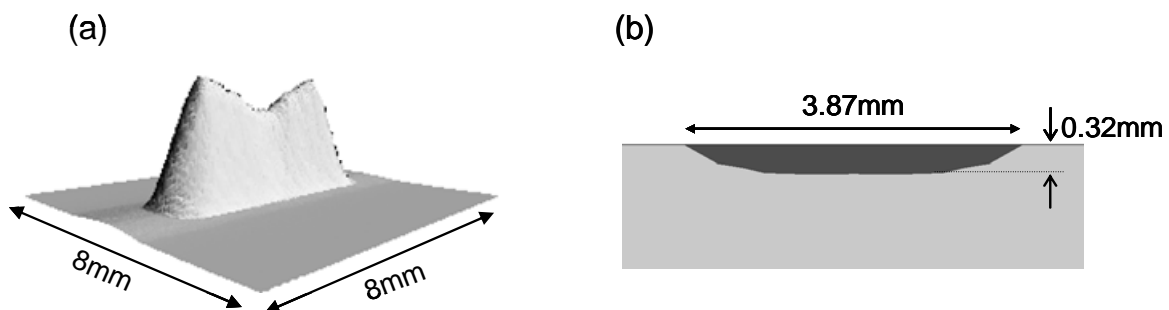


図 5.18 設計したサブホログラムでの光強度分布(a)と硬化部の断面形状(b)

5.3 CGHの製作と評価

5.3.1 CGHの製作

一般的なフォトリソグラフィとプラズマエッチングの技術を用いて透過型バイナリーCGHを製作した。基板は $\phi 50.8\text{mm}$ 、厚さ1mmの合成石英である。合成石英上にフォトレジストを塗布し、CGHパターンのフォトマスクと密着露光用のマスクアライナー（ズースマイクロテック社、MA6）を用いて、レジストにCGHのパターンを露光する。フォトレジストを現像した後、反応性イオンエッチングにより石英基板をエッチングした。エッチング装置にはサムコインターナショナル製のRIE-10Nを用いた。

レーザ光の波長が808nmの場合、合成石英の屈折率は $n=1.453$ [52]であるため、 π の位相差を得るためのCGHの凹凸深さは $0.89\mu\text{m}$ である。予備実験からエッチングレートは約 $16.2\text{nm}/\text{分}$ であったので、エッチング時間を55分としてCGHを複数枚製作し、測定によって凹凸深さが最も設計値に近かったものを後の実験に用いた。実験に採用したCGHの凹凸深さは $0.88\sim 0.91\mu\text{m}$ であった。最後に、CGHの表面および裏面に $\text{Ta}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ の薄膜を形成する反射防止コーティング処理を行った。コーティングの透過率は96.6%であった。

製作したCGHを図5.19に示す。なお比較実験のために中央部の強度低下がない、一様な強度分布を持つCGHも製作した。この分布は強度比が1.0に相当する。ここでは、この強度分布をフラットトップと呼ぶ。

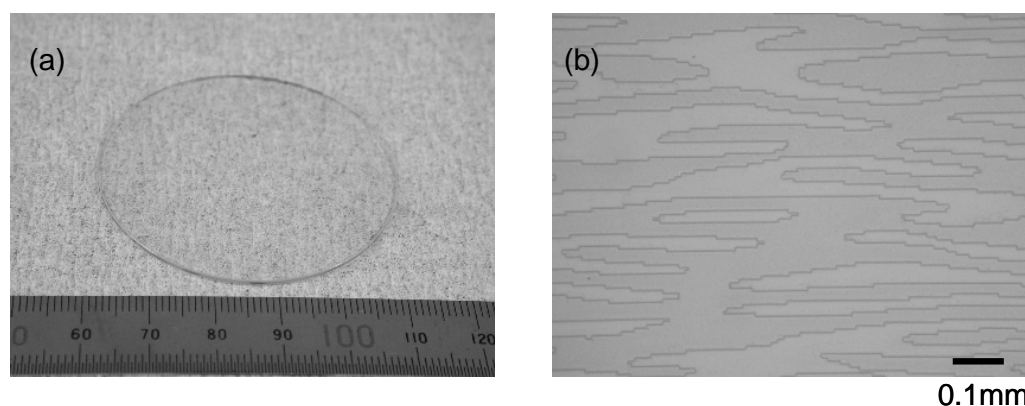


図 5.19 製作した CGH (a)CGH の写真, (b)CGH 表面拡大写真

5.3.2 CGHを用いた高出力半導体レーザ光の強度分布整形

製作したCGHを用いて高出力半導体レーザ光の強度分布整形実験を行った。実験装置の写真およびその装置構成の概略を図5.20に示す。高出力半導体レーザ（Laserline社、LDL160-1000）からの光は、コア径1mmの光ファイバで伝送され、光ファイバから出力された光はレンズ1によってコリメートされた後、CGHを透過し、レンズ2によって集光される。なお、半導体レーザ光には波長808nmと940nmの光が含まれているため、レンズ1でコリメートされた後、波長選択フィルタにて940nmの光を除去している。CCDカメラの受光部をレンズ2の焦点位置に設置し、整形されたレーザ光の強度分布を観察する。このとき、半導体レーザ装置の出力強度は最小設定値である0.1Wとし、さらにカメラの前にNDフィルタを設置して、強度を約1/4,000に減衰させた。

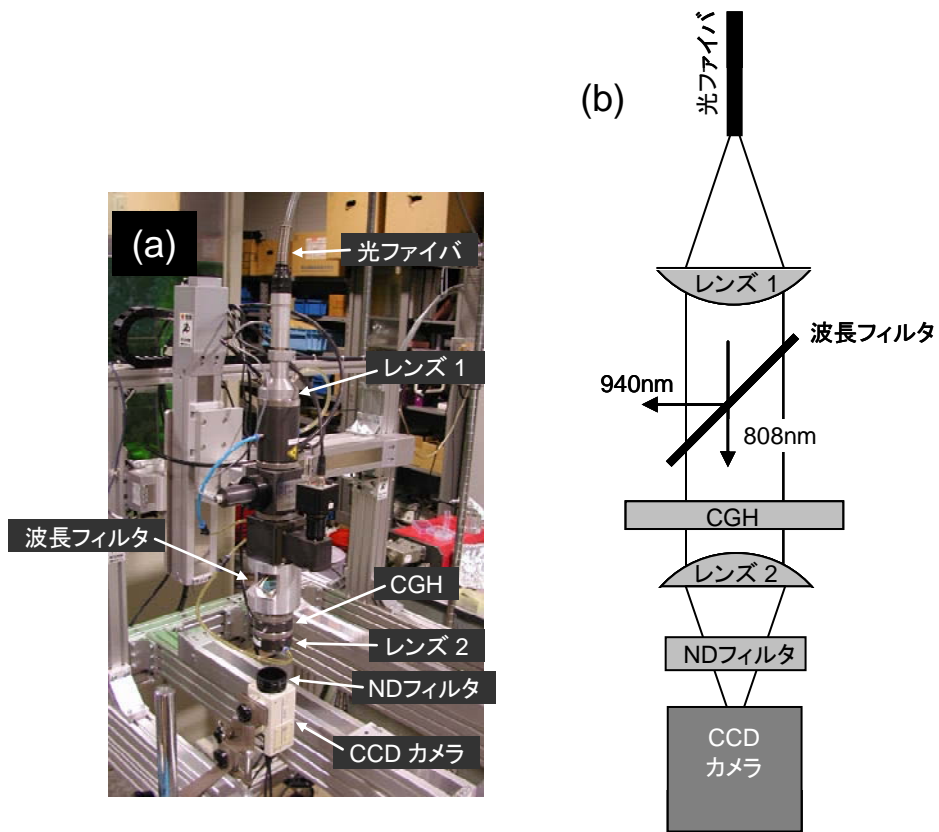


図 5.20 強度分布整形実験装置 (a)実験装置写真, (b) 実験装置概略図

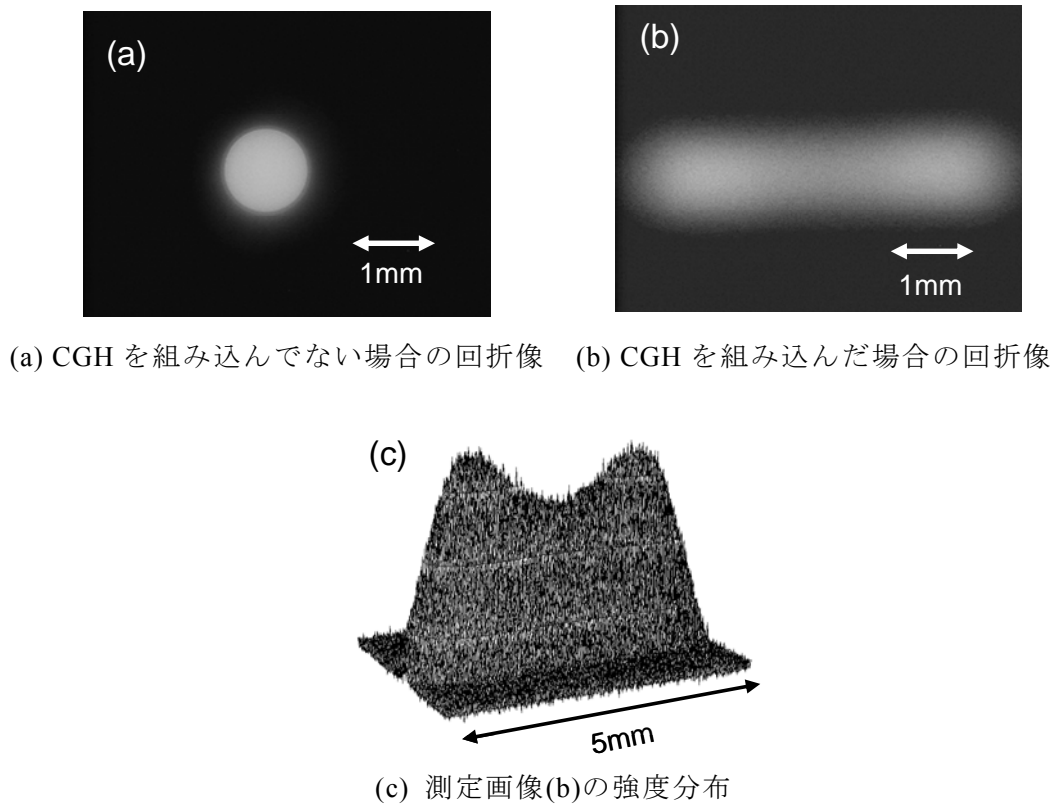


図 5.21 CGH を用いたレーザ光強度分布整形結果

CGH を装置に組み込んでない場合の測定画像と、CGH を装置に組み込み整形したレーザー光を測定した画像、およびその画像データを数値化して強度分布を求めた結果を図 5.21 に示す。CGH を組み込んでない場合は、光ファイバのコア径と同じ直径 1mm のほぼ均一な強度像だが、CGH を組み込むことによって設計通り 1.5mm×5mm の大きさの回折像が得られている。また、強度分布も M 字分布をしており、針状のノイズも見られない。整形したレーザー光強度分布の最大値と回折像の中心位置の強度との比は約 1.31 であり、設計値の 1.30 とほぼ等しい。

5.4 レーザ焼入れ実験

5.4.1 実験方法

製作した CGH を用いて整形したレーザー光で焼入れ実験を行った。レーザー焼入れ実験装置の概略は図 5.10 に示したとおりである。図では波長選択フィルタは省略している。レーザー焼入れは M 字分布とフラットトップの 2 種類のレーザー光強度分布で行った。また、比較のために、CGH を実験装置に組み込まず、デフォーカスさせたレーザー光による焼入れ実験も行った。この場合は、デフォーカス量 Df を 15mm とし、スポット径を約 4.5mm にした。試料は 5.1.1 節の実験と同じロットの炭素鋼 S45C を用いた。試料の前処理状態も 5.1.1 節と同じ条件で、焼ならし、焼入れ、および焼戻し処理を行った。試料の大きさは 60mm×40mm、厚さは 10mm である。試料表面は平面研削盤により研削した面とし、レーザー光の吸収剤は塗布しなかった。レーザー光を照射しながら試料を試料の長手方向に移動させてレーザー焼入れを行った後、硬化領域を測定するために、試料を移動方向に垂直な面で切断し、樹脂（フェノールブラック）に埋め込んで研磨した後、3%ナイトル液でエッチングした。

焼入れ実験の前に CGH をレーザー加工機に組み込むことによるレーザー光強度の減衰を測定した。その結果、M 字分布の CGH の場合は 3.5%の減衰、フラットトップの CGH の場合は、2.9%の減衰であった。これらの値は、先に述べた CGH の透過率測定結果とほぼ一致している。

一方、CGH の高出力レーザー光に対する耐久能力を調べるために、パワーが 2.5kW で面積が 17mm×20mm で均一な強度分布のレーザー光を CGH に 2 分間照射した。CGH 表面や強度分布整形結果に変化は見られず、CGH は実用的なレーザー加工にも適用できることを確かめた。

5.4.2 焼入れ硬化部の形状

各レーザー光強度分布で焼入れした試料の断面写真を図 5.22 に示す。M 字分布およびフラットトップを用いた実験では、レーザーパワーを 330W、試料移動速度を 5mm/s とした。またデフォーカスビームの場合、330W では試料は硬化しなかった。そこで試料移動速度を 5mm/s に固定し、レーザーパワーを変化させて焼入れ実験を行い、M 字分布の場合と同じ約 4mm の硬化幅が得られる条件を探した。その結果、レーザーパワーが 650W の場合に 3.80mm の硬化幅が得られた。この場合の硬化部の断面写真を図 5.22(c)に示す。いずれの強度分布でも硬化幅は約 4.0mm であるが、硬化形状には大きな違いがある。それぞれの平坦度は M 字分布では 0.63、フラットトップでは 0.38、デフォーカスビームでは 0.35 であり、M 字分布の場合に深さの均一性が最も高かった。

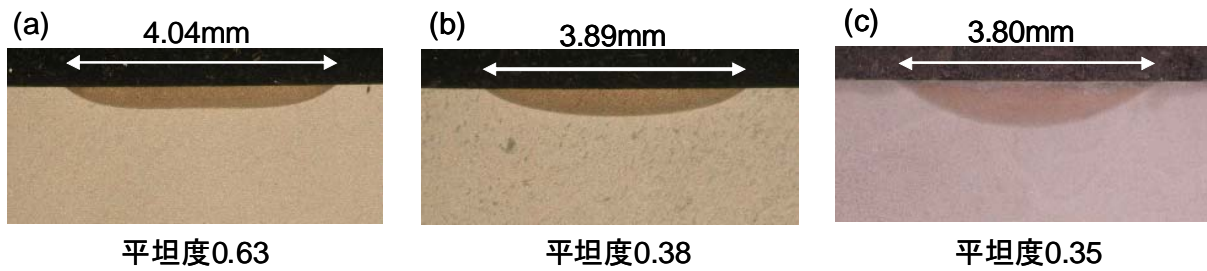


図 5.22 各レーザー光強度分布で焼入れを行った試料の断面写真
 (a) M 字分布 (レーザーパワー330W, 試料移動速度 5mm/s),
 (b)フラットトップ (レーザーパワー330W, 試料移動速度 5mm/s),
 (c)デフォーカスビーム (Df=15mm, レーザパワー650W, 試料移動速度 5mm/s)

M 字分布とフラットトップのレーザー光強度分布で、移動速度を変えて硬化部の形状を調べた結果を図 5.23 に示す。また、この場合の平坦度を図 5.24 に示す。M 字分布の方が硬化幅は広いが硬化深さが浅いことがわかる。試料移動方向に直交する方向の強度分布の幅はほぼ等しいが、M 字分布の方が両端の強度が強いために、硬化幅が広がっている。また、フラットトップは中央に熱が集中するため硬化深さが大きくなったと考えられる。平坦度は M 字分布の方が常に高く、速度を上げると平坦度が向上する。

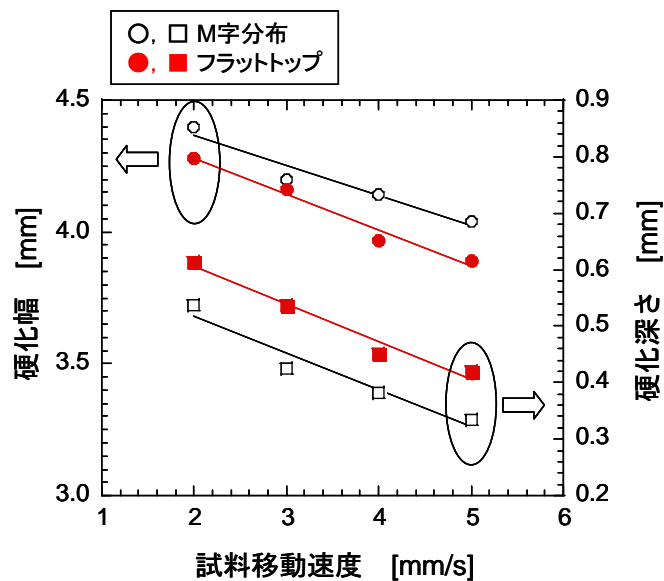


図 5.23 硬化部の形状と試料移動速度の関係

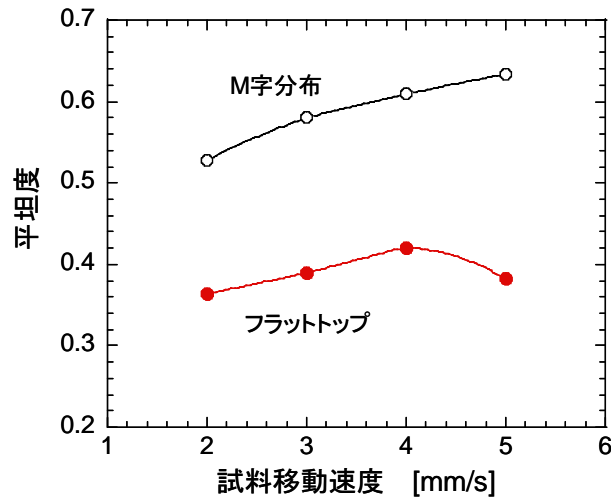


図 5.24 平坦度と試料移動速度の関係

5.4.3 焼入れ形状のシミュレーションとの比較

実験条件を元に熱解析シミュレーションを行い，硬化形状の計算結果と実験結果との比較を行った．試料の大きさは実験と同じ 60mm×40mm，試料の厚さは 10mm とした．また，物性値も温度依存性を考慮せず，5.1 節と同様に以下の値とした．

熱伝導率： $K=28.3\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ （室温から融点までの平均値）

熱拡散率： $a=5.52\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ （室温から融点までの平均値）

比熱： $C=720\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ （室温から融点までの平均値）

密度： $\rho=K/(a\cdot C)=7121\text{kg}/\text{m}^3$ 熱伝導率，熱拡散率，比熱から計算

レーザーパワーを 330W，レーザー光の吸収率を 43.5%，試料移動速度を 5mm/s として，図 5.18(a)に示す強度分布で試料中の温度分布を計算し，硬化部の形状を求めた．結果を図 5.25 に示す．5.1 節と同様に最高温度が 880℃以上になった領域を硬化部の領域と仮定すると，硬化幅は 2.40mm，硬化深さは 0.027mm となり，図 5.22(a)の実験結果（硬化幅 4.04mm，硬化深さ 0.34mm）とは大きく異なる結果になった．ここで，この硬化部の領域を決める際のしきい値となる温度を硬化温度と呼ぶ．鉄鋼材料の変態点は試料の加熱速度によって変化し[2]，レーザー焼入れの場合の正確な変態点は不明である．そこで，硬化温度を S45C の変態点程度の 790℃として，硬化部の形状を求めたが，図 5.25(b)のように，硬化幅は 3.20mm，硬化深さは 0.11mm となり，実験結果と一致しなかった．

さらに，硬化温度を 608℃とした場合，図 5.25(c)のように硬化幅 3.98mm，硬化深さ 0.34mm となり，実験結果に近い値が得られた．また，平坦度も 0.57 であり，実験結果の 0.63 に近い値になった．しかし，608℃は材料の S45C の変態点よりも低く，不自然な値である．このような実験結果と計算結果の不一致は，解析において材料の物性値の温度依存性を考慮していないことが原因として考えられる．一方，吸収率を 57.6%とすることによって，硬化温度が 790℃で実験結果と同じ形状を得ることもできるが，一般に波長 808~980nm の光に対する炭素鋼の吸収率は 40~50%であり[53]，57.6%は吸収率としては高すぎる値である．

フラットトップおよびデフォーカスビームについても硬化部の形状を計算した．硬化温度を 608℃とした場合，フラットトップでは硬化幅が 3.71mm，硬化深さが 0.49mm であり，

実験結果（硬化幅 3.89mm，硬化深さ 0.42mm）と比べて幅が狭く，深さが浅い硬化形状であった．デフォーカスビームについては硬化幅が 4.62mm，硬化深さが 1.23mm であり，実験結果（硬化幅 3.80mm，硬化深さ 0.65mm）と比べて硬化領域が逆に大きく見積もられた．正確な熱解析のためには，さらに検討を行う必要がある．

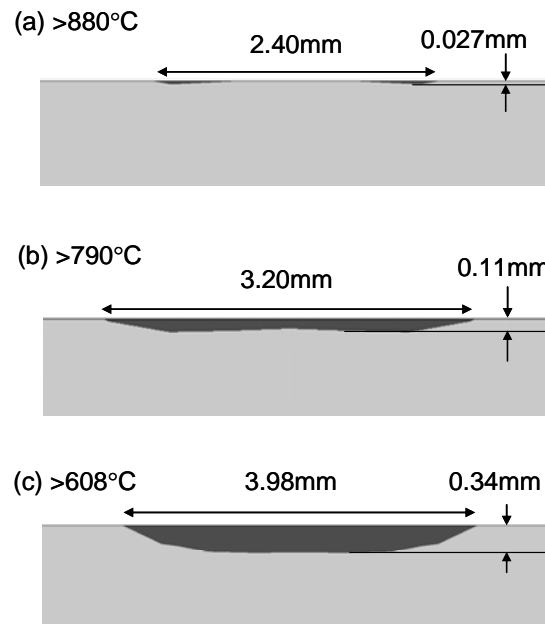


図 5.25 硬化温度と硬化形状の関係

レーザーパワー330W，試料移動速度 5mm/s

(a)硬化温度 880°C，(b)硬化温度 790°C，(c)硬化温度 608°C

5.4.4 硬化部の機械的特性

硬化部の機械的特性を調べるために硬化部表面の硬さ試験および摩耗試験を行った．試料はレーザーパワー330W，試料移動速度 3mm/s の条件で焼入れしたものを用いた．また，比較のためにデフォーカスビームを用いて焼入れを行った試料も用いた．このときレーザーパワーは 600W，試料移動速度は 3mm/s，デフォーカス量 Df は 15mm である．硬化された試料表面は，エメリー紙で研磨した後，アルミナ懸濁液を用いて研磨を行い，鏡面状態にした．この工程で表面は約 30 μ m 削られている．硬さ試験にはマイクロビッカース硬度計（明石製作所，MVK-E）を用い，荷重 2.94N（300gf）で測定した．

硬さ試験の結果を図 5.26 に示す．いずれの強度分布でも中心付近では 680HV 程度の硬さがあり，大きな差はない．また，M 字分布とフラットトップの場合は，硬化部の端までほぼ均一な硬さであるが，デフォーカスビームの場合は傾斜的に硬さが変化している．これはデフォーカスビームの場合，最高到達温度が A₁ 変態点と A₃ 変態点の間の温度であった領域が大きかったためと推測される．また，フラットトップよりも M 字分布の方が硬化部の幅が広い．これは図 5.23 に示したように，M 字分布の硬化幅が広いことに対応している．

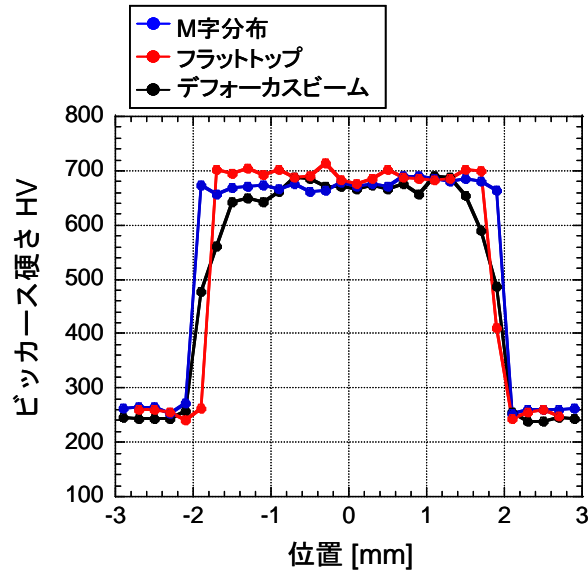


図 5.26 表面硬さ試験結果

試料移動速度 3mm/s

レーザーパワー330W (M字分布, フラットトップ),

レーザーパワー600W (デフォーカスビーム)

深さ方向の硬さ変化を調べるために硬化部の断面について硬さ試験を行った。表面から 0.1mm の深さと 0.3mm の深さにおける測定結果を図 5.27 に示す。どちらの強度分布でも深さ 0.1mm では 700HV 程度の硬さであり、大きな差はなかった。また深さ 0.3mm では、M字分布の場合、硬さが 600~700HV の間でばらついている。これは M字分布の場合の硬化深さが 0.42mm であり、フラットトップの場合の 0.54mm と比べて浅く、硬化した領域と母材の境界近傍を測定していることが原因だと考えられる。

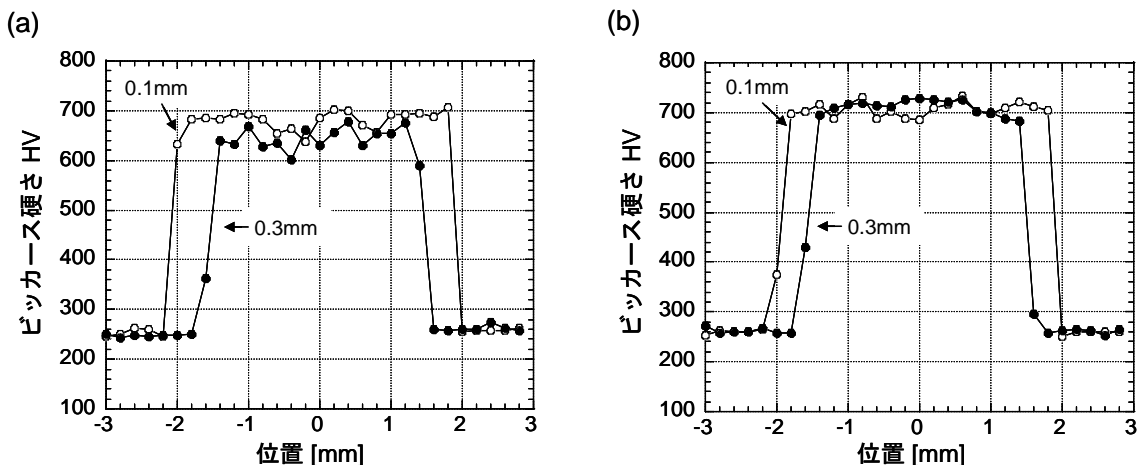


図 5.27 断面硬さ試験結果

(a) M字分布, (b)フラットトップ

測定位置 深さ 0.1mm, 深さ 0.3mm

次に硬化部の摩耗試験を行った。摩耗試験は大越式摩耗試験器で行った。摩耗試験の概略を図 5.28 に示す。リングの直径は 30mm，リングの幅は 2mm である。リングの素材は試料と同じ S45C とし，焼入れ焼戻しを行って硬さを約 250HV にしている。このリングを 636rpm で回転させながら，試料表面に 4.9N の力で押しつけて摩耗試験を行った。試料表面はあらかじめ #1000 のエメリー紙で研磨し，滑らかにした。潤滑剤は用いなかった。

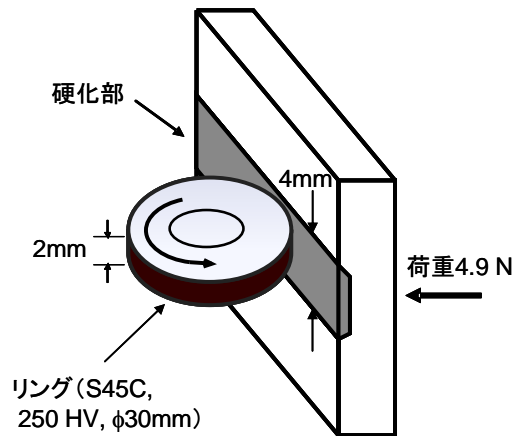


図 5.28 摩耗試験の概略図

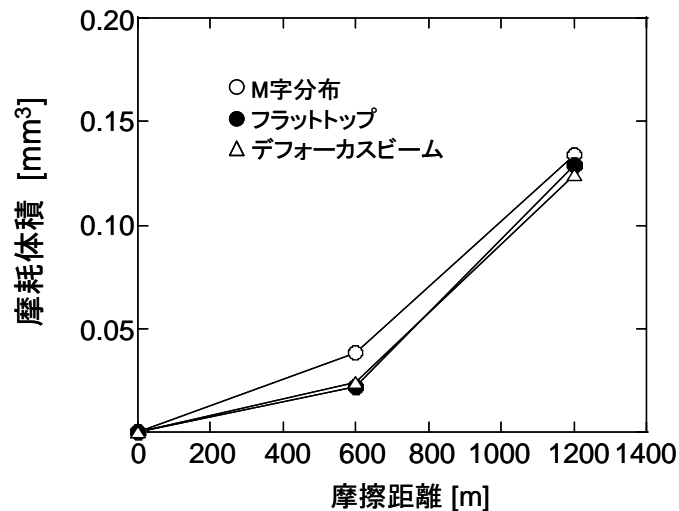


図 5.29 摩耗試験結果

摩耗試験の結果を図 5.29 に示す。母材の摩耗試験の結果は，摩擦距離 600m で摩耗体積が 4.58mm^3 であった。一方，レーザ焼入れを行った試料は，いずれの強度分布でも摩擦距離 600m で摩耗体積は 0.05mm^3 以下であり，母材の場合と比べると摩耗量が 1/90 以下になっており，レーザ焼入れにより耐摩耗性が向上していた。

図 5.29 から M 字分布の摩耗量が少し多いように見える。また，摩擦距離が 0~600m と 600~1200m では摩耗量の増加傾向に違いがある。しかし，今回の実験では摩耗試験での測定誤差が大きく，この程度の違いは誤差の範囲内である。さらに，摩耗痕の深さは摩擦距離 600m の場合 0.015mm，1200m の場合 0.04mm 程度であり，硬化深さの 0.4~0.5mm と比

べるとかなり浅く、この程度の摩耗痕の深さではレーザー光の強度分布による耐摩耗性の違いは顕著に現れないと考えられる。レーザー光の強度分布が耐摩耗性に及ぼす影響を議論するには、さらに詳細な検討を行う必要がある。

以上の硬さ試験、および摩耗試験の結果からは、レーザー光強度分布の違いによる硬化部の機械的特性の顕著な差は見られなかった。

5.5 まとめ

本章では、光ファイバで伝送された高出力半導体レーザー光に CGH を適用するための CGH の設計方法を提案し、実際に設計通りの強度分布の整形が行えることを示した。また、レーザー光の強度分布を制御することによって、レーザー焼入れにおいて鉄鋼材料に形成される硬化部の深さ分布の均一性向上に取り組んだ。とくに、硬化深さが均一になるように、熱解析シミュレーションを利用して整形の目標とするレーザー光強度分布を設定した。

石英基板の透過型バイナリーCGHを製作し、それを用いて整形したレーザー光強度分布は、目標通りの強度分布であった。整形したレーザー光を用いてレーザー焼入れを行った結果、従来の強度分布と比べて平坦度の高い硬化形状が得られた。ただし、得られた形状は熱解析シミュレーションの結果とは、よい一致を示さなかった。この点については、今後の課題である。さらに、硬化部の機械的特性を評価するために硬さ試験および摩耗試験を行った結果、他の強度分布を用いた場合と同程度の特性が得られた。

第6章 結論

本研究では、レーザ表面処理の品質向上に寄与する高出力レーザ加工用回折光学素子に関する研究を行った。本研究で得られた結論をまとめると以下の通りである。

第1章では、レーザ表面処理の現状と CGH をレーザ表面処理に用いる場合の課題について述べ、本研究の目的を明らかにした。

第2章では、反射型曲面 CGH の基本的な設計方法についてまとめた。また、基板上に CGH パターンを描画するレーザ描画装置を改造し、曲面形状に応じてフォーカスを調整する機能を付加した。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により銅の放物面鏡上にバイナリー形状の CGH を製作した。これを用いて強度分布整形を行った結果、目標とする $1\text{mm}\times 4\text{mm}$ の強度分布とほぼ同じ大きさに整形することができた。しかし、整形された強度分布には多数の針状のノイズが含まれていた。シミュレーションによる検討の結果から、ノイズの原因は CGH の表面形状がバイナリー形状であったこと、および、製作における表面凹凸形状高さのずれにあることがわかった。

第3章では、平面銅基板上に、マルチレベルの CGH を製作することに取り組んだ。マルチレベル形状を実現する手法として、フォトレジストパターンをマスクとして基板への銅めっきを繰り返す「マスクめっき法」を考案し、8段階の形状をもつマルチレベル CGH を製作した。低出力炭酸ガスレーザを使って整形された光強度分布を観察した結果、バイナリーCGHのものに比べてより目標に近い回折パターンが得られ、回折効率率は69.2%であった。また、バイナリーCGHでの回折パターンで現れた針状の極端なノイズも低減されたが、スペckルのような強度むらが残った。この原因を数値シミュレーションによって検討した結果、表面形状の凹凸高さのばらつきにあることがわかった。また、高出力炭酸ガスレーザ加工機に製作した CGH を搭載し、強度分布の整形実験を行った。200W のレーザ光の強度分布を整形した結果、CGH に損傷はなく、強度分布を整形できた。しかし、整形された強度分布の形状は目標とする強度分布よりも大きくなっていった。この原因は CGH の設置ずれや CGH に入射するレーザ光強度分布が想定よりも乱れていたためだと考えられる。

3.2 節ではマルチレベル CGH を用いて複雑な強度分布への整形を実現できることを示すために、マーキング用 CGH の開発に取り組んだ。また、めっき治具を改良して CGH 表面の凹凸高さのばらつきの改善に取り組んだ。その結果、高さのばらつき（高さの差の標準偏差）の最大値を $0.96\mu\text{m}$ から $0.29\mu\text{m}$ に改善することができた。また、強度分布整形を行った結果、目標通りの複雑な強度分布に整形することができ、アクリルへのマーキングも行うことができた。

第4章では、曲面上へのレーザ描画技術とマスクめっき法を用いて集光機能を持つ曲面マルチレベル CGH を製作した。製作した CGH を用いて強度分布整形を行った結果、目標とする強度分布に近い分布に整形することができた。回折効率率は67.8%であり、3.1 節の平面マルチレベル CGH で得られた効率と同程度であった。また、高出力炭酸ガスレーザ加工機に CGH を搭載し、1.5kW のレーザ光を整形して、鉄鋼材料に照射し、熔融特性を調べた。その結果、一般の加工に用いられる強度分布とは異なる熔融特性を示し、熔融幅と熔融深さを容易に制御できることが分かった。

第5章では、光ファイバから出力されたレーザ光を整形する CGH の設計手法について検討した。また、レーザ光源を高出力半導体レーザとし、強度分布を整形することによ

て、レーザー焼入れで得られる硬化形状の制御に取り組んだ。設計手法は、光ファイバの射出面全体に多数の点光源が存在すると仮定し、各点光源からのレーザー光が CGH によって整形されて得られた強度分布を足しあわせることによって、最終的に整形されたレーザー光強度分布が得られるものとした。実際に製作した CGH による半導体レーザー光の回折パターンは上記の仮定のもとに設計されたものと良く一致した。また、レーザー焼入れで得られる硬化形状の制御については、熱解析シミュレーションを利用して硬化深さが均一になるように、レーザー光強度分布を最適化した。製作した CGH を使って焼入れ実験を行った結果、硬化深さの均一性が向上したことを確認した。硬化部の機械的特性についても硬さ試験や摩耗試験によって評価したが、他のレーザー光強度分布による焼入れ結果との差異は認められなかった。

当初の研究目標に立ち返って、本研究で得られた結果を整理すると、

課題 1) 銅製の反射型で集光機能を持った炭酸ガスレーザー用 CGH の開発：

本研究を通して、以下の技術を開発した。

- ・曲面上に CGH のパターンニングを行うレーザー描画装置
- ・銅の基板上に複雑で微細な多段形状を形成するマスクめっき法

この 2 つの技術を利用して銅の放物面鏡上に反射型マルチレベル CGH を製作することができた。製作した CGH を用いて、レーザー光強度分布整形を行った結果は以下の通りである。

- ・ほぼ目標通りの強度分布整形を実現
- ・回折効率 67.8%
- ・強度分布には強度むらが発生

強度むらの発生は課題である。強度むらの改善には、より精度の高い CGH の製作が必要である。しかし、レーザー表面処理では加工時の熱伝導により、強度のばらつきが加工結果に及ぼす影響は小さくなる。今回見られた程度の強度むらであれば、実用上問題ない。また、回折効率の向上も今後の課題である。

高出力炭酸ガスレーザー加工機に CGH を搭載し、整形したレーザー光を鉄鋼材料に照射して熔融特性を調べた。その結果は以下の通りである。

- ・1.5kW の高出力レーザー光に対する耐久性を確認
- ・整形されたレーザー光強度分布と目標強度分布とのずれ発生
(形状のずれと強度分布にノイズ発生)
- ・強度分布整形により熔融形状の制御が容易になることを確認

以上から、製作した CGH を高出力レーザーに適用可能であることを確認するとともに、CGH を用いることにより、レーザー表面処理の結果を制御できる可能性を示した。今後は、具体的なレーザー表面処理に CGH を利用し、CGH を使う利点を明らかにしていく必要がある。また、高出力レーザーの場合、レーザー光強度分布が CGH の設計時に想定した強度分布と大きく異なっていたために、強度分布整形結果も目標とする強度分布とは異なるものになった。設計時に CGH を適用するレーザーの強度分布をもとに CGH を設計することも今後検討する必要がある。

課題 2) 光ファイバ伝送の高出力半導体レーザー用 CGH の設計手法の確立：

光ファイバ伝送の高出力半導体レーザー光の CGH 設計手法については、光ファイバ射出面全体に多数の点光源が存在すると仮定し、各点光源からのレーザー光が CGH によって整形されて得られた強度分布を足しあわせることによって、最終的に整形されたレーザー光強度分布が得られるものとした。この設計手法に基づいて CGH を設計、製作した結果、設計通りの強度分布に整形できた。

課題 3) レーザ表面処理における適切な光強度分布設定手法の確立：

本研究では、熱解析シミュレーションを利用して、強度分布の設定を行った。シミュレーション結果に基づいて CGH を設計、製作し、レーザ焼入れ実験に用いた。その結果、シミュレーション結果と実験結果は定性的に一致したが、定量的には一致しなかった。定性的に一致したことから、レーザ表面処理において、強度分布の設定に熱解析シミュレーションを利用することは有効な手法であるといえる。定量的な一致に至らなかったのは、利用した熱解析シミュレーション方法に原因がある。この課題に対しては、より高精度な熱解析シミュレーションを利用することによって改善できる。

以上のように、高出力レーザを用いた表面処理のための CGH について、その設計方法と製作方法を確立することができた。今後は、実際に CGH を利用することによって、レーザ表面処理で得られた処理層の機能や特性が向上することを示し、レーザ表面処理に CGH を適用することの価値を示していく必要がある。さらに、CGH を実際のレーザ表面処理の分野で普及させるためには、CGH の製作コストも下げる必要がある。半導体レーザ用 CGH の場合、その基板は石英板である。フォトマスクさえ用意すれば、通常の微細加工技術により簡単に CGH を製作でき、低コスト化が実現できる。今後、CGH を利用することによって、レーザ表面処理がさらに価値のある処理方法として発展することを願っている。

付録

CGH パターンの形状と整形できる強度分布の関係

ここでは、第5章で述べた CGH パターンのピクセル数とピクセルサイズ、整形できる強度分布の大きさと細かさの関係を示す。CGH パターンの模式図を図 A-1 に示す。ピクセルの大きさを $d \times d$ とし、CGH パターンの大きさを $D \times D$ とする。CGH パターンはピクセル $N \times N$ 個で構成されるものとする。従って、次式が成り立つ。

$$D = N \times d \quad . \quad (\text{A-1})$$

CGH を用いた強度分布整形のための光学系のモデルを図 A-2 に示す。CGH を透過した光がレンズによって集光され、レンズの焦点位置（観測面）で目標とする強度分布に整形されるものとする。ここで、記号を次のように定める。

(x_1, y_1) : CGH 面内の座標,

(x_2, y_2) : 観測面内の座標,

z : x_1 軸, y_1 軸に直交し、CGH からレンズに向かう方向を正とする軸,

$U_0(x_1, y_1, z)$: CGH に入射する光の複素振幅分布,

$A_0(x_1, y_1, z)$: CGH に入射する光の振幅分布,

$U_2(x_2, y_2)$: 観測面上の光の複素振幅分布,

$F(x_1, y_1)$: CGH が光波に与える作用を表す関数

f : レンズの焦点距離,

r_0 : レンズ中心と CGH 間の距離,

λ : レーザ光の波長,

k : レーザ光の波数 ($=2\pi/\lambda$),

とする。

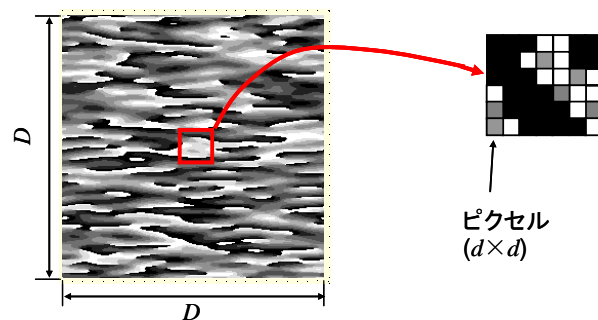


図 A-1 CGH パターンの模式図

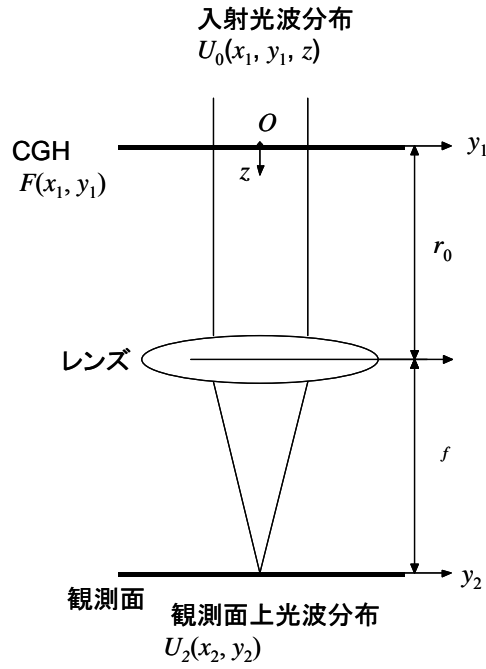


図 A-2 CGH を用いた強度分布整形モデル

$F(x_1, y_1)$ と $U_2(x_2, y_2)$ の関係は、2章の(2.42)式より、次のように表される。

$$U_2(x_2, y_2) = -\frac{i}{\lambda f} \exp\left[-ik\left\{r_0 + f + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2f}\left(1 - \frac{r_0}{f}\right)\right\}\right] \times \iint F(x_1, y_1) A_0(x_1, y_1, 0) \exp\left\{ik \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{f}\right\} dx_1 dy_1 \quad (\text{A-2})$$

ここで、

$$X = x_2 / \lambda f, Y = y_2 / \lambda f \quad , \quad (\text{A-3})$$

$$C = -\frac{i}{\lambda f} \exp\left[-ik\left\{r_0 + f + \frac{x_2^2 + y_2^2}{2f}\left(1 - \frac{r_0}{f}\right)\right\}\right] \quad , \quad (\text{A-4})$$

とすると、(A-2)式は次のように変形される。

$$U_2(x_2, y_2) = C \iint F(x_1, y_1) A_0(x_1, y_1, 0) \exp\{2\pi i(Xx_1 + Yy_1)\} dx_1 dy_1 = C \cdot \text{FT}[F(x_1, y_1) A_0(x_1, y_1, 0)] \quad (\text{A-5})$$

ただし、 $\text{FT}[\]$ はフーリエ変換を表している。

フーリエ変換には次式で表される畳み込み積分定理が成り立つ[54].

$$\text{FT}[g_1] \otimes \text{FT}[g_2] = \text{FT}[g_1 \times g_2] \quad (\text{A-6})$$

ただし、 g_1, g_2 は関数である。 \otimes は畳み込み積分を表している。この定理を利用すると、次の式が成り立つ。

$$FT[F(x_1, y_1) A_0(x_1, y_1, 0)] = FT[F(x_1, y_1)] \otimes FT[A_0(x_1, y_1, 0)] \quad . \quad (\text{A-7})$$

(A-7)式を(A-5)式に代入して書き直すと、次式のように表される。

$$U_2(x_2, y_2) = C \cdot FT[F(x_1, y_1)] \otimes FT[A_0(x_1, y_1, 0)] \quad . \quad (\text{A-8})$$

(A-8)式中の $F(x_1, y_1)$ は CGH パターンを表しており、ピクセルの集まりで表される。ピクセルの集まりで表現した $F(x_1, y_1)$ を $Fp(x_1, y_1)$ とすると、(A-8)式は次式で表される。

$$U_2(x_2, y_2) = C \cdot FT[Fp(x_1, y_1)] \otimes FT[A_0(x_1, y_1, 0)] \quad . \quad (\text{A-9})$$

ここで、 $Fp(x_1, y_1)$ は次式で表すことができる。

$$Fp(x_1, y_1) = \{ F(x_1, y_1) \Sigma \delta(x_1 - md) \delta(y_1 - nd) \} \otimes t(x_1, y_1) \quad . \quad (\text{A-10})$$

ただし、 m, n は整数である。 $\delta(x_1 - md)$ 、 $\delta(y_1 - nd)$ は次式で表される関数である。

$$\delta(x_1 - md) = \begin{cases} 1 & (x_1 = md) \\ 0 & (x_1 \neq md) \end{cases}, \quad \delta(y_1 - nd) = \begin{cases} 1 & (y_1 = nd) \\ 0 & (y_1 \neq nd) \end{cases} \quad . \quad (\text{A-11})$$

$t(x_1, y_1)$ は次式で表される関数である。

$$t(x_1, y_1) = \begin{cases} 1 & (|x_1| \leq d/2 \text{ AND } |y_1| \leq d/2) \\ 0 & (|x_1| > d/2 \text{ or } |y_1| > d/2) \end{cases} \quad . \quad (\text{A-12})$$

また、 $\Sigma \delta(x_1 - md) \delta(y_1 - nd)$ を次式のくし形関数で定義する。

$$comb(x_1/d, y_1/d) \equiv \Sigma \delta(x_1 - md) \delta(y_1 - nd) \quad . \quad (\text{A-13})$$

(A-13)式を(A-10)式に代入して変形すると次式が得られる。

$$Fp(x_1, y_1) = \{ F(x_1, y_1) comb(x_1/d, y_1/d) \} \otimes t(x_1, y_1) \quad . \quad (\text{A-14})$$

ここで、 $FT[Fp(x_1, y_1)]$ に畳み込み積分定理を適用する。

$$\begin{aligned} FT[Fp(x_1, y_1)] &= FT[\{ F(x_1, y_1) comb(x_1/d, y_1/d) \} \otimes t(x_1, y_1)] \\ &= FT[F(x_1, y_1) comb(x_1/d, y_1/d)] \times FT[t(x_1, y_1)] \\ &= \{ FT[F(x_1, y_1)] \otimes FT[comb(x_1/d, y_1/d)] \} \times FT[t(x_1, y_1)] \quad . \end{aligned} \quad (\text{A-15})$$

$FT[comb(x_1/d, y_1/d)]$ を計算すると、次式のように変換される。

$$FT[comb(x_1/d, y_1/d)] = (1/d^2) comb(X \cdot d, Y \cdot d) \quad . \quad (\text{A-16})$$

(A-16)式を(A-15)式に代入して変形すると次式が得られる。

$$FT[Fp(x_1, y_1)] = (1/d^2) \{ FT[F(x_1, y_1)] \otimes comb(X \cdot d, Y \cdot d) \} \times FT[t(x_1, y_1)] \quad . \quad (\text{A-17})$$

(A-9)式に(A-17) 式を代入すると，次式が得られる．

$$\begin{aligned}
 U_2(x_2, y_2) &= C \cdot FT[Fp(x_1, y_1)] \otimes FT[A_0(x_1, y_1, 0)] \\
 &= C \cdot (1/d^2) \cdot \{FT[F(x_1, y_1)] \otimes comb(X \cdot d, Y \cdot d)\} \times FT[t(x_1, y_1)] \\
 &\quad \otimes FT[A_0(x_1, y_1, 0)] \quad . \quad (A-18)
 \end{aligned}$$

(A-18)式の $comb(X \cdot d, Y \cdot d)$ は X が $1/d$ の周期で 1 になる．つまり， x_2 が $\lambda f/d$ の周期で 1 になる．また， Y の値についても同様に $y_2 = \lambda f/d$ 周期で 1 になる．このことは， $U_2(x_2, y_2)$ は観測面上で x_2, y_2 のそれぞれの方向について $\lambda f/d$ ごとに同じ分布が繰り返されることを意味している．従って，整形される強度分布の大きさは， $|x_2| < \lambda f/d, |y_2| < \lambda f/d$ を満たすように決める必要がある．

参考文献

- [1] T.H.Maiman : Stimulated optical radiation in ruby, *Nature*, 187, (1960), pp.493-494
- [2] レーザー学会編：レーザープロセッシング応用便覧，エヌジーティー，(2006)
- [3] (社)日本溶接協会 表面改質技術研究委員会編：レーザ表面処理の現状と展開，(2001)
- [4] 新井武二：レーザ加工基礎のきそ，日刊工業新聞社，(2007)
- [5] 西本和俊：入門教室 表面改質 第4回 レーザによる表面改質，*溶接技術*, 35, 12, (1987), pp.103-111
- [6] (財)光産業技術振興協会：光産業動向調査，*オプトニュース電子版*, 1, (2007)
- [7] E.Schubert, I.Zerner and G.Sepold : New possibilities for joining by using high power diode lasers, *Proc. ICALEO, G*, (1998), pp.111-120
- [8] M.M.Chen : The use of kaleidoscope to obtain uniform flux over a large area in a solar imaging furnace, *Appl. Opt.* 2, (1963), pp.265-271
- [9] 石出孝，妻鹿雅彦，松本長，伊東収二，三橋庸良：CO₂，YAG レーザ用カライドスコープの表面硬化処理への実用，第25回レーザ熱加工研究会論文集，(1991)，pp.189-201
- [10] F.D.Seaman and D.S.Gnamuthu : Using the industrial laser to surface harden and alloy, *Metal Progress*, August, (1975), pp.67-74
- [11] 松山秀信，柴田公博，加納眞，二宮隆二：レーザクラッド技術のバルブシートへの適用，第50回レーザ熱加工研究会資料集，(2000)，pp.1-8
- [12] A.V.La Locca, E.Ramos and M.Cantello : Laser surface hardening of thin steel slabs, *J.Mat.Sci.*, 22, (1987), pp.1737-1742
- [13] C.E.Cole, S.C.Noden, J.R.Tyrer and P.A.Hilton : The application of optical elements in high power laser material processing, *Proc. ICALEO, A*, (1998), pp.84-93
- [14] 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), pp.4411-4418
- [15] J.Kell, J.R.Tyrer, J.Jones and S.Noden : Computer generated holographic optics used in laser powder fusion, *Proc. ICALEO*, (2003), pp.162-168
- [16] J.Kell, J.Tyrer, R.Higginson, R.Thomson, J.Jones and S.Noden : Computer generated holographic optics used in laser powder fusion, *Proc. ICALEO*, (2004), pp.603-612
- [17] M.K.H.Leung, H.C.Man and J.K.Yu : Theoretical and experimental studies on laser transformation hardening of steel by customized beam, *Int. J. Heat and Mass Trans.*, 50, (2007), pp.4600-4606
- [18] M.Gibson, J.Tyrer and R.Higginson : Novel computer generated diffractive optics modifying beam characteristics to improve the microstructures of directly deposited inconel 625, *Proc. ICALEO*, (2008), pp.7-13
- [19] M.Gibson, J.Tyrer and R.Higginson : The use of holographically customised beam profiles to control the overall physical cross section of direct metal deposition, *Proc. ICALEO*, (2008), pp.57-63
- [20] (社)応用物理学会 日本光学会 光設計研究グループ監修：回折光学素子入門，オプトロニクス社，(1997)
- [21] 小館香椎子：回折光学，*レーザ加工学会誌*, 12, (2005), pp.31-37

- [22] J.M.Moran : Laser machining with a holographic lens, *Appl. Opt.*, 10, (1971), pp.412-415
- [23] A.Engel and G.Herziger : Laser machining with a modulated zone plates, 13, *Appl.Opt.*, (1974), pp.269-273
- [24] J.C.Angus, F.E.Coffield, R.V.Edwards, J.A.Mann, R.W.Rugh and N.C.Gallagher : Infrared image construction with computer-generated reflection holograms, 16, *Appl.Opt.*, (1977), pp.2798-2799
- [25] M.Ekberg, M.Larsson, A.Bolle and S.Hard : Nd:YAG laser machining with multilevel resist kinoforms, *Appl.Opt.* 30, 25, (1991), pp.3604-3606
- [26] C.Haupt, M.Pahlke, E.Jäger and H.J.Tiziani : Design of diffractive optical elements for CO₂-laser material processing, *Proc.SPIE*, 1718, (1992), pp.175-180
- [27] A.Holmer and S.Hard : Laser machining experiment with an excimer laser and a kinoform, *Appl.Opt.* 34, 33, (1995), pp.7718-7723
- [28] J.R.Tyrer, S.C.Noden and P.A.Hilton : Diffractive optical elements for manipulation of high power CO₂ laser radiation - a feasibility study, *Proc.SPIE*, 2789, (1996), pp.174-185
- [29] 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), pp.119-127
- [30] 尼子淳, 吉村和人 : 回折型ビーム整形素子を用いた CO₂ レーザ切断加工, *レーザー加工学会誌*, 13, 2, (2006), pp.117-121
- [31] J.Amako, K.Umetsu and H.Nakao : Laser soldering with light-intensity patterns reconstructed from computer-generated holograms, *Appl.Opt.*, 40, (2001), pp.5643-5649
- [32] J.Kell, J.Tyrer, R.Higginson and R.Thomson : Microstructural characterization of autogenous laser welds on 316L stainless steel using EBSD and EDS, *J.Microscopy*, 217, (2005), pp.167-173
- [33] J.Kell, J.Tyrer, R.Higginson, R.Thomson, J.Jones and S.Noden : Holographic diffractive optical elements allow improvements in conduction laser welding of steel, *Proc. ICALEO*, (2006), pp.8-17
- [34] 江畑恵司, 布施敬司, 栗巢賢一, 岡田健, 平井隆之, 難波宏邦 : レーザ加工用回折型光学部品の現状と今後の展開, 第 52 回レーザー加工学会論文集, (2001), pp.1-8
- [35] 栗巢賢一, 平井隆之, 布施敬司, 岡田健, 江畑恵司, 池ヶ谷明彦, 龍見雅美 : レーザ加工用回折型光学部品の開発, *SEI テクニカルレビュー*, 159, (2001), pp.72-77
- [36] 栗巢賢一, 平井隆之, 後利彦, 布施敬司, 岡田健, 江畑恵司 : 表面微細加工技術開発による ZnSe-DOE の実用化, 第 55 回レーザー加工学会論文集, (2002), pp.90-97
- [37] K.Kurusu, T.Hirai, T.Ushiro, K.Fuse, T.Okada and K.Ebata : Beam-splitting ZnSe diffractive optical element, *Proc.SPIE*, 4830, (2003), pp.313-318
- [38] 布施敬司, 平井隆之, 塩崎学, 岡田健, 栗巢賢一, 江畑恵司 : レーザ加工用多段階位相回折型光学部品の開発, *SEI テクニカルレビュー*, 162, (2003), pp.71-78
- [39] 平井隆之, 布施敬司, 栗巢賢一, 江畑恵司 : 回折型ビームホモジナイザの開発, *SEI テクニカルレビュー*, 166, (2005), pp.13-18
- [40] 布施敬司 : レーザ加工用高機能・新機能光学素子, *レーザー加工学会誌*, 12, (2005), pp.215-220
- [41] V.S.Pavelyev, V.A.Soifer, D.L.Golovashkin, V.V.Kononenko, V.I.Konov, S.M.Pimenov, M.Duparre and B.Luedge : Diamond DOEs for focusing of IR laser beams into pregiven focal domains, *Proc.SPIE*, 5182, (2003), pp.222-232
- [42] C.Hembd-sollner, C.Budzinski and H.J.Tiziani : Binary gratings for CO₂ laser beam

- diagnostics, Appl.Opt., 35, (1996), pp.3662-3670
- [43] 阿部信行：高出力半導体レーザーによる直接材料加工，レーザー加工学会誌，9, (2002), pp.7-12
- [44] 高橋礼司：高出力半導体レーザーとその応用，レーザー加工学会誌，9, (2002), pp.22-25
- [45] レーザライン社カタログ，(2009)
- [46] 小山次郎，西原 浩：光波電子工学，コロナ社，(1978)
- [47] 宮本 勇 丸尾 大：直線偏光レーザーを用いる変態硬化，溶接学会論文集，12, (1994), pp.351-357
- [48] R.W.Gerchberg and W.O.Saxton：A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures, Optik, 35, (1972), pp.237-246
- [49] 京谷達也：放物面鏡について，レーザー熱加工研究会誌，1, (1997), pp.58-66
- [50] 最新表面処理技術総覧編集委員会編：最新表面処理技術総覧，(1988), pp.285
- [51] 牧之内三郎，難波義治，大村悦二：ステップ熱入力によるレーザー硬化処理，日本機械学会論文集，C, 49, (1983), pp.98-105
- [52] 信越石英株式会社，石英ガラス技術ガイド2，pp.7
- [53] E.Kennedy, G.Byrne and D.N.Collins：A review of the use of high power diode lasers in surface hardening, J. Mater. Proces. Technol. 155-156, (2004), pp.1855-1860
- [54] 辻井重男，鎌田一雄：デジタル信号処理，昭晃堂，(1990)

謝辞

本論文をまとめるにあたり，終始ご懇切なるご指導とご教示を賜りました大阪府立大学工学研究科 菊田久雄教授に謹んでお礼申し上げます。

また，本論文に対して，御審査いただき，貴重なるご助言とご校閲を賜りました大阪府立大学 工学研究科 杉村延広教授，三村耕司教授に厚くお礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり，数々の貴重なるご助言とご教示を賜りました大阪府立大学名誉教授 岩田耕一先生（現 大阪府立産業技術総合研究所研究顧問）に厚くお礼申し上げます。

本研究の遂行にあたり，多大なご協力を賜りました，大阪府立産業技術総合研究所 横井昌幸課長，山口勝己系統括，出水敬主任研究員，朴忠植主任研究員，近畿大学 加藤暢宏助教授に厚くお礼申し上げます。

さらに数多くのご助言，ご協力を賜りました大阪府立産業技術総合研究所および大阪府地域結集型共同研究事業「テラ光情報基盤技術開発」参画の関係各位に深く感謝申し上げます。

最後に，数多くのご協力を賜りました大阪府立大学 工学研究科 機械工学分野 機械計測工学研究グループの関係各位に厚くお礼申し上げます。特に，研究遂行にご協力いただいた元学生の三俣真理，赤松宏明，蛭原哲弘，清水聡一郎，安藤輝 各氏に厚くお礼申し上げます。