

形状可変ミラーを用いた複合化レーザー加工機による 切削加工技術の研究開発（第2報）

高尾 清利*1・岩間 貴司*1・藤原 和徳*1・宮川 和幸*1・古川 保典*2・森田 正隆*2
福井 達雄*2・廣橋 淳二*2・時田 宏典*2・志村 努*3

Research and Development of Cutting Processing Technology by Laser Processing Machine with Shape Changeable Mirror(2nd report)

Kiyotoshi TAKAO*1, Takashi IWAMA*1, Kazunori FUJIHARA*1, Wako MIYAGAWA*1, Yasunori FURUKAWA*2
Masataka MORITA*2, Tatsuso FUKUI*2, Junji HIROHASHI*2, hironori TOKITA*2 and Tsutomu SHIMURA*3

要 約

形状可変ミラーを搭載したレーザー加工機を試作し、簡単な加工実験を行った。開発概要は以下のとおりである。

- (1) ビーム整形制御の自動化に伴い、信頼性向上および高性能化を目的に形状可変ミラーの試作評価を行った。
- (2) ビーム整形装置に制御アルゴリズムを組み込んだソフトウェアを開発し、コンピュータ制御によるビーム整形実験の自動化の検証と最適化を行った。また、整形したビーム形状をデータベース化し、このデータベースライブラリーから目的のビーム形状を能率的かつ高速に得られる手法を確立した。
- (3) ビーム整形を自動制御するため、検出時間 300 回/秒以上の性能を有するビーム形状検出装置を開発した。
- (4) 制御アルゴリズムをソフトウェア化し、形状可変ミラーと上記の検出装置を組合せて試作したコンパクトビーム整形実験装置を用いて、3つのビーム形状（ライン形状、トップハット形状、リング形状）の自動制御化に成功した。

1. 緒 言

携帯電話やノートパソコンに代表されるモバイル機器分野において、現在主に用いられている穴あけ加工は、炭酸ガスレーザーのガウシアンビーム形状による穴径 100 μm 以上の加工である。一方、近年、電子部品の微細化ニーズが急速に高まっており、例えば次世代の携帯電話などにおいては 30 μm 以下の微細加工技術が必要とされ、今後、この微細化に対するニーズは益々高まっていくものと予測される。しかしながら、30 μm 以下の微細加工に対するアプローチとして、紫外線レーザー加工機なども検討されているが、現状では高い技術的ハードルや高価な設備導入コストのため現場での実用化に至っていない。

一般的に、レーザー加工で使用されるビーム形状はガウシアンビームが採用されている。これは、ガウシアンビームがエネルギーの空間分布には優れないものの、レーザー光の伝播状態を制御しやすい利点を持つ。しかし、従来のレーザー加工（例えば穴あけ加工）においては、ガウシアンビーム形状を微小スポット径に絞り込んでいるた

め、レーザービームは被加工物の面上でエネルギーの空間分布を生ずる。そのため、従来のレーザー加工機で実現する場合、加工形状は深さ方向に対して不均一となり、加工状況が変化する毎にレーザー光源と加工光学系の複雑な光軸調整を必要とし、ビーム形状を制御したうえで加工条件等の最適化を行わなければならなかった。

また、被加工物や材料等が変更される場合、光学部品等の調整はその都度手作業で行うという煩わしさがあった。その光学系は、収差の小さい高精度な固定レンズ及び固定ミラーの選別と組合せによって行われるため、結果的にシステム、加工コストともに高価になるという課題があった。こうした課題を解決するため、任意に形状を変化できる形状可変ミラーを開発する。

本研究では、次世代加工技術で要求される高速高精度レーザー加工を達成するため、ビーム形状を自在に制御できる形状可変ミラーを搭載したレーザー加工機を開発する。形状可変ミラーの駆動電極形状とミラーコーティングの最適化を図るとともに、ビーム形状の計測と自動制御機構を併せて開発する。今年度は、昨年度に引き続きミラーコーティング膜の開発を行うとともに、レーザービーム整形性能の評価、ビーム形状検出装置の開発、制御アルゴリズムのソフトウェア化とともに加工実験も実施する。

*1 山梨県工業技術センター

*2 株式会社オキサイド

*3 国立大学法人東京大学生産技術研究所

2. 形状可変ミラー搭載レーザ加工機の試作

2-1 形状可変ミラーの構造設計

昨年度は形状可変ミラーの構造設計を行い、応答速度が500Hz、ビーム整形性能でトップハットビーム形状やラインビーム形状等の整形性能が検証された。今年度は、ビーム整形制御の自動化に伴い、信頼性向上および高性能化を目的とし、形状可変ミラーの基本構成部品である薄膜可変ミラー部と電極基板の電極形状の最適化に向けて構造の検討・設計を行なった。形状可変ミラーは、図1に示すように可動部分である薄膜ミラーおよびその形状を制御する複数の電極構造を持つ電極基板とで構成される。

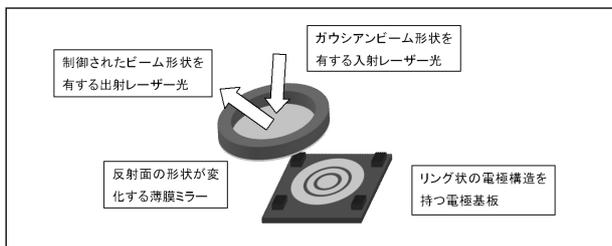


図1 形状可変ミラー構造図

2-1-1 ポリマー薄膜の応答性能の比較と評価

目標のビーム形状を形成するためには、形状可変ミラーの自動制御に伴い、数千回形状可変ミラーを駆動する必要がある。そこで、1000Hz以上の応答性能を目標にポリマー基板の改良と性能評価を実施した。

評価方法は、昨年度と同様に薄膜と電極基板を約100 μ mの距離に固定し、両者の間に255Vのサイン波形の電圧信号を印加、繰り返し周波数を最大2000Hzまで上げ応答周波数特性の評価を行った。検出は、薄膜の反射コーティング面にHe-Neレーザを照射し、反射光が形状可変ミラーで集光する位置にフォトダイオードを設置し(図2参照)、そのポイントにおける出力の変化を観測した。

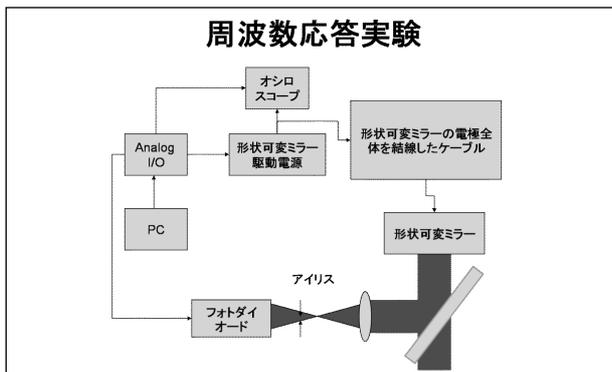


図2 周波数応答実験

その結果、目標とする1000Hz以上の応答性能が得られることを確認した。

2-1-2 電極基板形状の設計

薄膜基板を使用する形状可変ミラーでビーム整形制御を行う場合、ビーム整形性能には以下の2点が重要な要素である。第一に入射ビーム形状に対し適切な電極配置がされていること。第二に反射面である薄膜の面張力が中心から放射状に均質な張力を有していることである。

レーザ加工機のビーム形状が円形山形であるガウシアンビーム形状を有しており、トップハットビーム形状やリング形状、ラインビーム形状へビーム整形を行う場合、中心からリング状に配置され、かつ放射方向に8分割された構造が最適であることが実験結果から得られた。本年度はさらに精密な制御を行うために、図3に示すように中心点の外側に4列のリングを配し、33個の電極構造を設計した。

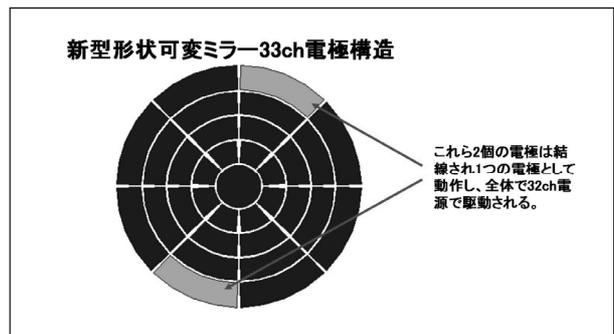


図3 新型形状可変ミラー33ch電極構造

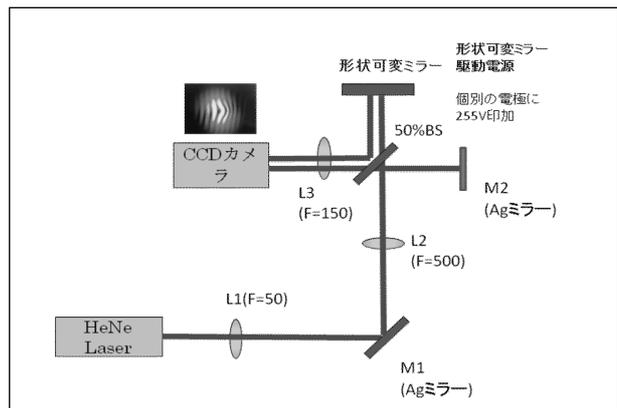


図4 Influence Function実験のレイアウト

次に、ポリマー膜が均質に張られ、かつ反射膜コーティングが均質に施されていることを確認するために、Influence Functionの評価実験を行った。図4にInfluence Function実験のレイアウトを示す。実験装置はHe-Neレーザ(1mW, ϕ 1mm)を光源に、レンズL1(FL=50mm)およびレンズL2(FL=500mm)で ϕ 10mm

に拡大，透過率 50%のビームスプリッター（50%BS）で透過光と反射光（参照光）に分離し，透過光は形状可変ミラーに入射し，その反射光と前記 50%BS にて反射された参照光は反射ミラー（M2）で反射され，再度，ビームスプリッター（50%BS）を透過した一部のビームと形状可変ミラーから反射されたビームとの干渉縞を観測し記録した．電極基板はリボンケーブルを介し形状可変ミラー駆動電源に接続し，制御コンピュータ上の駆動ソフトで個別の電極に順時，255V を印加し，ミラー面の電極位置に対応する位相変化の干渉縞を記録した．実験結果より均質な張力を有することが確認された．

2-1-3 形状可変ミラー筐体の試作・評価

形状可変ミラーは，外部環境の空気振動の影響を受けやすく，更に電極基板部のコネクタが露出しており，外部からの電磁ノイズの影響を受けやすい．よって，レーザ加工機が設置される工場環境で使用する場合にはこれらノイズに対する環境対策のために適切なパッケージにより保護する必要がある．そこで，金属性筐体を設計し，外部ノイズの影響を低減するパッケージの試作評価を行った．設計の際は，以下の点を考慮した．

- ・筐体は電磁波の影響を考慮し金属製（アルミニウム）
- ・外部空気振動や埃から保護するため形状可変ミラーの入射ウインドウを設置
- ・筐体の光学調整を考慮しマウント部に光学ミラーマウントを直接取り付け

試作した形状可変ミラーの筐体パッケージを図 5 に示す．この筐体パッケージでは他の実験装置やエアコン等の外部影響を受けず，安定に動作することが確認できた．

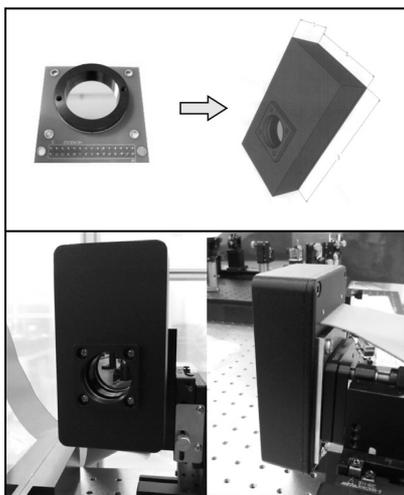


図 5 形状可変ミラーの筐体パッケージ

2-2 レーザビーム整形性能評価

昨年度手動調整で行った形状可変ミラーのビーム整形

実験について，ビーム整形装置に制御アルゴリズムを組み込んだソフトウェアを開発し，コンピュータ制御によるビーム整形の自動化の検証と最適化を行った．

2-2-1 ビーム整形性能の評価方法と装置

手動であったビーム整形について，コンピュータ制御による自動ビーム整形実験を行った．ソフトウェアは波面解析装置の波面解析ソフトウェアとして構築した．

微細加工用レーザ装置に搭載されている紫外線レーザは目視による光学調整は行えないので，He-Ne レーザを紫外線レーザの光軸と一致させ，光学ガイドビームとして使用しビームエキスパンダー等光学部品の調整を行った．次に，形状可変ミラーをセットアップし，駆動ソフトウェアの形状可変ミラー制御で中心に位置する電極に電圧を印加しビーム検出器で検出されるビーム形状の中心部に高輝度点を合わせ調整を行った．光学調整は，形状可変ミラーのビーム整形性能を決定する要素であり，各部の光学部品の偏心なく，測定ビーム形状が可能な限り円形に成るよう慎重に調整を行う必要がある．図 6 にビーム整形実験装置概要図を，図 7 に装置の外観を示す．

コンピュータ制御による自動ビーム整形装置は，ガウシアンビーム形状を有する入射レーザ装置（微細加工レーザ装置やファイバーレーザ発振器など），形状可変ミラー，ビーム形状検出装置および光軸調整を行う光学部品やビームエキスパンダー等で構成される．微細加工レーザ装置の場合，ビームエキスパンダーを形状可変ミラー前に挿入し，入射するレーザビーム径を適切に広げる（ $\phi 15\text{-}20\text{mm}$ 程度）．また，形状可変ミラーで反射されたレーザビームの一部と取り出しビーム形状検出器へ導くピックアップミラーが必要である．今年度は，微細加工用レーザ装置をベースにしたビーム整形実験装置に加え，新たにコンパクトビーム整形実験装置を試作し可搬型ビーム整形レーザ加工装置の検証を行った．これは汎用型のビーム整形装置の実現を目指し，既存のレーザ加工機へ組み込みを可能とするコンパクトな実験装置である．

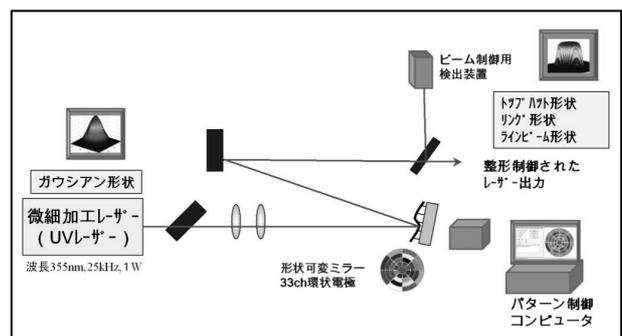


図 6 ビーム整形実験概要図

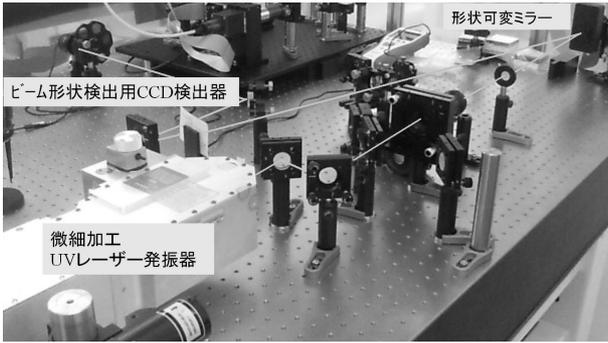


図7 レーザビーム整形実験装置外観

2-3-2 ビーム整形実験結果

図8にビーム整形実験に用いたコンパクトビーム整形実験装置の全体を示した。また、ビーム形状の自動整形制御実験の結果を図9~11に示した。以下トップハットビーム形状、リングビーム形状、ラインビーム形状等のビーム整形実験の手順とその結果について簡単に述べる。

図9は、トップハットビーム形状の自動整形制御の手順と制御結果である。まず、目標ビーム形状を設定する。設定手順は、ビーム設定画面上ビーム外形寸法、ビーム外周のオーダーおよび Threshold を設定する。その後、制御アルゴリズムを選択し自動制御を開始する。実験では、ビーム計測とフィッティング計算 60ms×繰り返し回数 550=5.5min ほどでビーム整形が完了した。これは手動調整に比べ数分の1の時間となった。

図10は、リングビーム形状の制御結果を示しており、1000回の繰り返し計算で10minほどでビーム整形が完了した。図11は、ラインビーム形状の制御結果で、500回の繰り返し計算でビーム整形が完了した。



図8 コンパクトビーム整形実験装置

2-3-3 ファイバーレーザーとコンパクトビーム整形実験装置の一体化

本年度の研究開発の一環として、ファイバーレーザー発

振器と自動制御ビーム整形装置を一体化したレーザー加工実験装置の設計、試作組立と評価を行った。ファイバーレーザーとコンパクトビーム整形実験装置を一体化して試作した装置の模式図と全体写真を図12及び13に示す。この装置は、電子部品など微細切削穴あけ加工を低価格で複合加工を実現するコンパクトな可搬型加工装置の評価実験システムとして設計を行った。外形寸法は500×700mmで、この実験システムをベースに来年度はさらにB4程度のコンパクトなレーザー加工機の実現を目指す予定である。

2-4 ビーム形状検出装置の開発

形状可変ミラーによるビーム整形装置の自動化を目標として、ビーム形状の高速検出器の開発を行った。

ビーム整形制御の自動化において、ビーム形状を高速で検出し、制御コンピュータで目標の形状と比較分析し、制御アルゴリズムにより形状可変ミラーをパターン制御する。この繰り返しを自動かつ高速で行うことで目標のビーム形状に収束し、ビーム整形が達成できる。加工現場においてビーム形状等加工条件の変更や最適化を短時

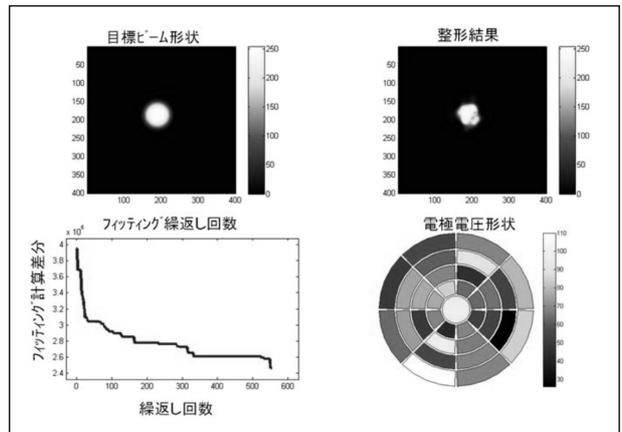


図9 ビーム整形実験 (トップハット)

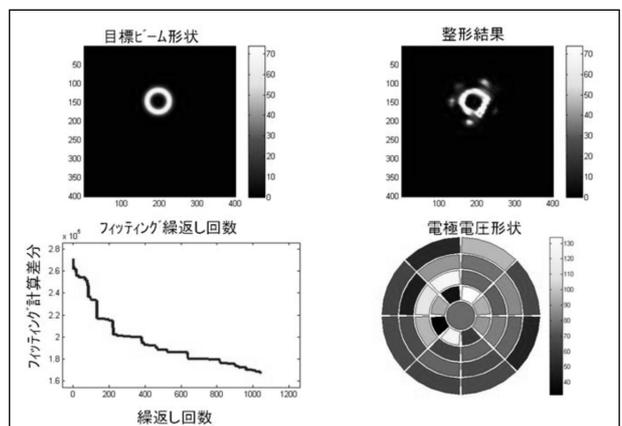


図10 ビーム整形実験 (リングビーム)

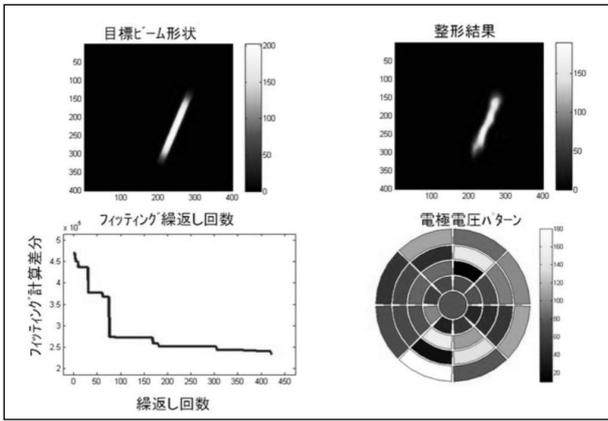


図 11 ビーム整形実験（トップハット）

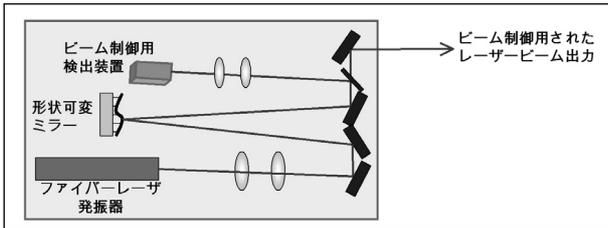


図 12 コンパクトビーム整形実験装置概要図

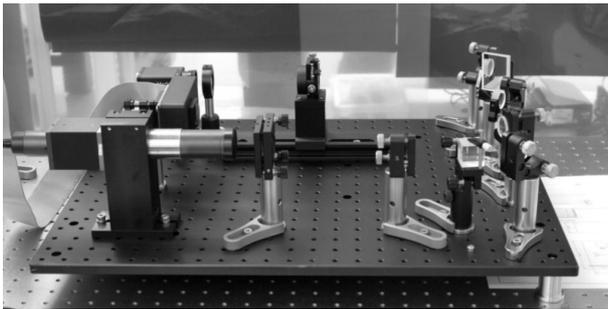


図 13 コンパクトビーム整形実験装置

間（数分から数 10 分）で行う手段は、形状可変ミラーを用いたビーム整形制御技術の他にないと考えられる。

ビーム検出器は、ビーム形状を高速（検出速度 <0.01 秒）に取り込み比較計算を実施できなくてはならないため、高速な C-MOS 検出器をベースにしたものと PIN-PD をベースにしたものを試作し、比較実験を行い、適切な検出装置を開発する。

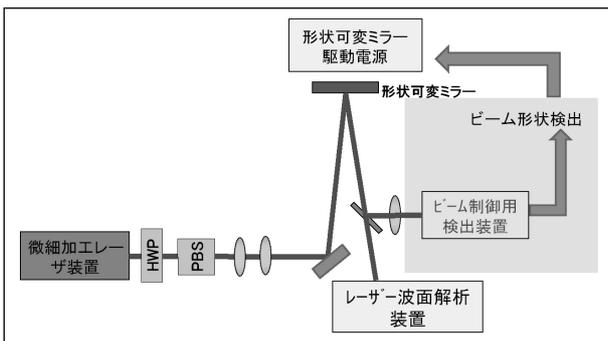


図 14 ビーム形状検出器の検出実験概要図

形状可変ミラーを用いたビーム整形自動制御によるビーム整形では、ビーム形状の検出、計算、制御を数百回から数千回繰り返す必要があり、ビーム形状検出器の高速化は重要な課題である。そこで、今回目標画像検出速度として 100fps（fps：frame per second）以上と設定した。この目標に基づいて本年度は、ビーム整形の自動化に必要な高速ビーム形状検出装置の開発を行った。

一般的なビーム形状検出装置では、画像取り込み時間が 1 秒間に数回が限度であり、数百回以上ビーム形状の計測を繰り返す自動ビーム整形制御ではビーム形状の計測に数 10 分からそれ以上の時間がかかる。そこで、高速マシンビジョンを使用することで 1 秒間に数百フレームの画像取り込みが可能となるが、これらのマシンビジョンは検出部に保護カバーガラスが取り付けられており、レーザービームの検出には干渉縞が発生しビーム整形制御の妨げになる。このカバーガラスを除去した高速度カメラにより、画像検出速度を計測した。検出装置の評価実験は、図 14 のように微細加工レーザを光源とし、パソコン上の画像を取込み、二種類の異なる OS を持つパソコンにて受光素子数の制御と画像取り込み速度の比較評価により行った。その結果いずれの OS でも本高速度マシンビジョンの画像検出速度が 300~1000fps の性能を有することが確認できた。

この検出器を基本にビーム形状検出に必要なレンズ・減衰フィルターの組込みやカバーガラスの取り外し、高速ビーム形状検出装置（図 15）を完成した。



図 15 高速ビーム形状検出器

2-5 制御アルゴリズムのソフトウェア化

昨年度に検証をした 2 種類のアルゴリズムのうち、一方は大局的なビーム整形制御に適し、もう一方はビーム形状ライブラリーから選択したビーム形状の安定化制御に適切であるという結果が得られた。これらの制御アルゴリズムを実際に形状可変ミラーの駆動装置の制御系に組み込み、それぞれ実験から性能の実証を行う。

本プロジェクトで目標とする自動ビーム整形制御は、入力レーザのビーム形状の計測、目標のビーム形状と入力レーザビーム形状の差異を比較計算して、制御アルゴ

リズムによる形状可変ミラー電極のパターン制御の作業を繰り返すことによって、ビーム形状と目的のビーム形状との差異が最小になるようにする。この制御アルゴリズムによって目標のビーム形状が得られる。図 16 にビーム整形制御の自動化ソフトウェアの各種制御のコンピュータ画面の一例を示した。

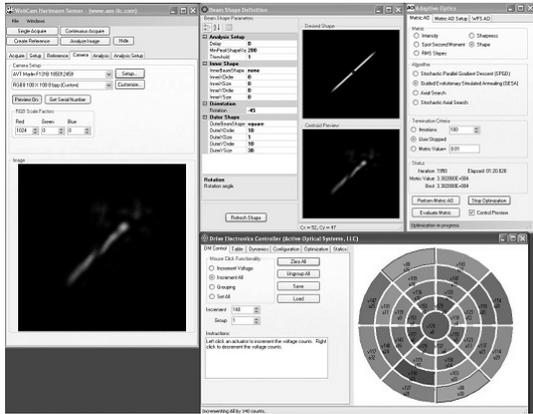


図 16 ビーム整形制御ソフトウェア画面

本年度は自動制御を効率的に行う制御アルゴリズムとして昨年調査検討を行った GESA および SPGD を波面解析ソフトウェア上に組み込み、形状可変ミラー駆動ソフトウェアと統合しビーム整形の自動化を可能にする制御ソフトウェアを完成した。

3. レーザ加工評価

3-1 目的

本年度試作した形状可変ミラーを組み込んだコンパクトビーム整形実験装置を用いて加工性能の評価を行った。加工性能の評価は、被加工物の加工状態を電子顕微鏡を用いて観察することにより、ファイバーレーザーのガウシアンビーム形状による加工とビーム整形を行ったトップハットビーム形状およびリングビーム形状の加工形状を比較し、ビーム整形技術を加工に応用する可能性を検証した。

3-2 実験方法

ビーム整形されたレーザー加工機による基礎的な加工状態を確認するため、試作した IPG フォトニクス社製ファイバーレーザーを光源としたコンパクトビーム整形装置を使用して各種材料にレーザー加工を行い、加工形状を日本電子(株)社製の走査電子顕微鏡 JSM-5310LV 及び ZYGO 社製の非接触表面形状測定機 New View6300 により観察・評価を実施した。レーザー加工条件は次のとおりである。また、対象とした被加工物を表 1 に示す。

<加工条件>

加工面出力：10W

発振周波数およびパルス幅：20kHz・100ns

レーザービーム径：10~20μm

被加工物送り速度：約 40mm/sec

表 1 被加工物

	材質	厚さ (mm)
No.1	ポリイミド樹脂	3.5
No.2	A5052	0.5
No.3	SUS304	0.5

3-3 ファイバーレーザー加工条件

図 17 にファイバーレーザー加工機の光学系を示す。発振器の波長は 1064nm、パルス幅 100nsec でスキャン方式としては固定光学系と簡易な被加工物の移動により加工実験を行った。またアシストガスは使用せず加工を行った。

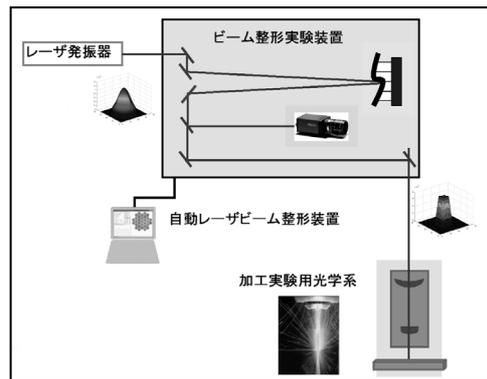


図 17 ファイバレーザ加工装置概要

3-4 実験結果

3-4-1 各種材料へのレーザー加工

図 18 に、ポリイミド樹脂の加工状態を走査電子顕微鏡により評価した結果を示した。加工状態はミットヨ製の測定顕微鏡 MF-510/TH で評価した。また、図 19 に金属材料 (A5052) の評価結果を示した。図から明らかのように加工切断面と深穴加工とで加工穴内壁で差異が見られる。樹脂材料は、ほとんどの材料で金属材料と比較して加工幅において 5~6 倍の加工痕跡が見られ、熱的プロセスの影響が現れている。

3-4-2 まとめ

今回、ビーム整形による比較加工実験において加工面の移動等を簡易に行った。しかしながら一部の顕微鏡写真にビーム形状に応じた加工状態の差異が見受けられた。来年度は精密な加工光学系および加工ステージを使用し

た加工状態の比較実験を計画している。また、レーザービーム加工形状の評価手法として電子顕微鏡による観察及び非接触表面形状測定機による形状評価が有効である事が明らかとなった。

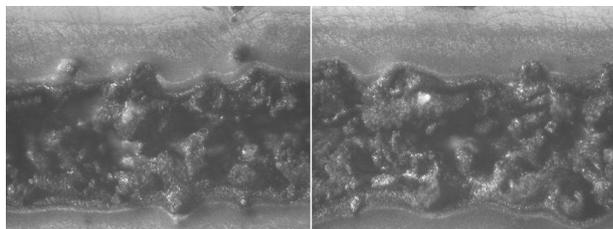


図 18 ポリイミドの加工 (右：開発装置による)

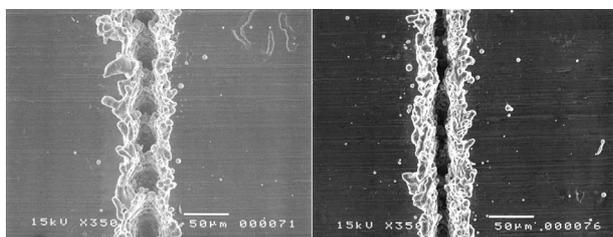


図 19 A5052 の加工 (右：開発装置による)

4. 結 言

本年度は、昨年開発を行った形状可変ミラーとビーム整形装置の一体化および自動制御を可能にするビーム整形制御ソフトウェアを製作し、自動ビーム整形実験を行うとともに、自動制御による加工レーザーのビーム整形を実証した。

形状可変ミラーは昨年度の赤外線レーザー用コーティングの継続開発に加え微細加工用レーザーに適応するべく紫外線レーザー用コーティングも開発し、ダメージ評価等を実施し、それぞれ目標とすべきレーザー出力に耐えうる性能を有していることが実証された。今後は信頼性向上を目標に更なる試作、評価を継続し幅広くレーザー加工機に適応する形状可変ミラーの実用化を目指す。自動制御ビーム整形装置はコンパクトビーム整形実験装置として一体化して基本ビーム形状であるガウシアンビーム形状とビーム整形を行ったリング形状の加工ビームによる比較加工実験を行った。本年度はレーザー加工に必要な加工光学系や精密ステージが準備できなかったが、来年度はこれらを準備し、ビーム整形による高品質加工の比較実験を実施する予定である。

自動化ビーム整形ソフトウェアに関して、本年度は波面解析用ソフトウェア上に制御アルゴリズムを組み込み自動ビーム整形制御ソフトウェア化した。次年度はソフトウェアの信頼性向上とユーザーフレンドリーな操作性を目標にソフトウェアの改良を進める。

参考文献

- 1) 宮崎俊行編：レーザー加工技術，産業図書，P.18