

平成 21 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「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」

研究開発成果等報告書

平成 22 年 3 月

委託者 関東経済産業局
委託先 財団法人やまなし産業支援機構

目次

第1章 研究開発の概要	
1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1－2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	4
1－3 成果概要	7
1－4 当該研究開発の連絡窓口	8
第2章 本論	
1 高精度・超精密加工課題への対応	
1－1 形状可変ミラーの構造設計	9
1－2 形状可変ミラーのコーティング性能の評価	11
1－3 レーザービーム整形性能の評価	16
2 高効率化、付加加工及び除去加工の複合化への対応	
2－1 形状可変ミラーの制御用検出装置の開発	22
2－2 形状可変ミラーの制御アルゴリズムの確立	23
2－3 制御アルゴリズムのソフトウェア化	27
最終章 全体総括	29

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

【研究背景】

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が、本申請の川下業者である電子機器類(特にプリント基板)加工業者の主要製品となる。当該分野において、現在主に用いられている穴あけ加工は、ガウシアンビーム形状の炭酸ガスレーザーによる穴径 100 ミクロン以上の加工である。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 ミクロン以下の微細加工技術が必要とされており、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ている。

しかしながら、30 ミクロン以下の微細加工に対するアプローチとして、紫外線レーザー搭載のレーザー加工機なども検討されているが、現状では、その高い技術的なハードルや大きな設備コストのため実用に至っていない。また、一般的に、レーザー加工で使用されるレーザー形状はガウシアンビーム形状のものが採用されている。この理由は、ガウシアンビームは、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ためである。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。そのため加工形状は深さ方向に対して不均一となり、従来のレーザー加工機で微細加工を実現する場合、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行い、ビーム形状を制御したうえ加工条件等の最適化をしなければならなかった。また、被加工対象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、収差の小さく高精度な固定レンズおよび固定ミラーの選別と組合せによって行われるため、結果的にシステムは高価なものとなり加工コストは高くなってしまいう問題があった。こうした問題を解決するため、本申請の技術では、任意に形状変化が可能な形状可変ミラーを採用する。形状可変ミラーとは、ミラーの反射面の裏側に複数のアクチュエーターを配し、おのおののアクチュエーターを独立して制御することにより、任意の反射面形状を実現することができるミラーである。これにより、任意の光波面の制御(たとえば、凹・凸レンズ、円筒レンズ、非球面レンズ、焦点距離の連続的制御など)機能を持たすことが可能となる。

【研究の目的及び目標】

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ことを目的に、自動制御された形状可変ミラーを搭載したレーザー加工機を開発し、ビーム形状を自在に制御出来るレーザー切削加工技術を開発する。具体的には、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開発する。これら要素技術をレーザー加工機として統合し、高度な加工技

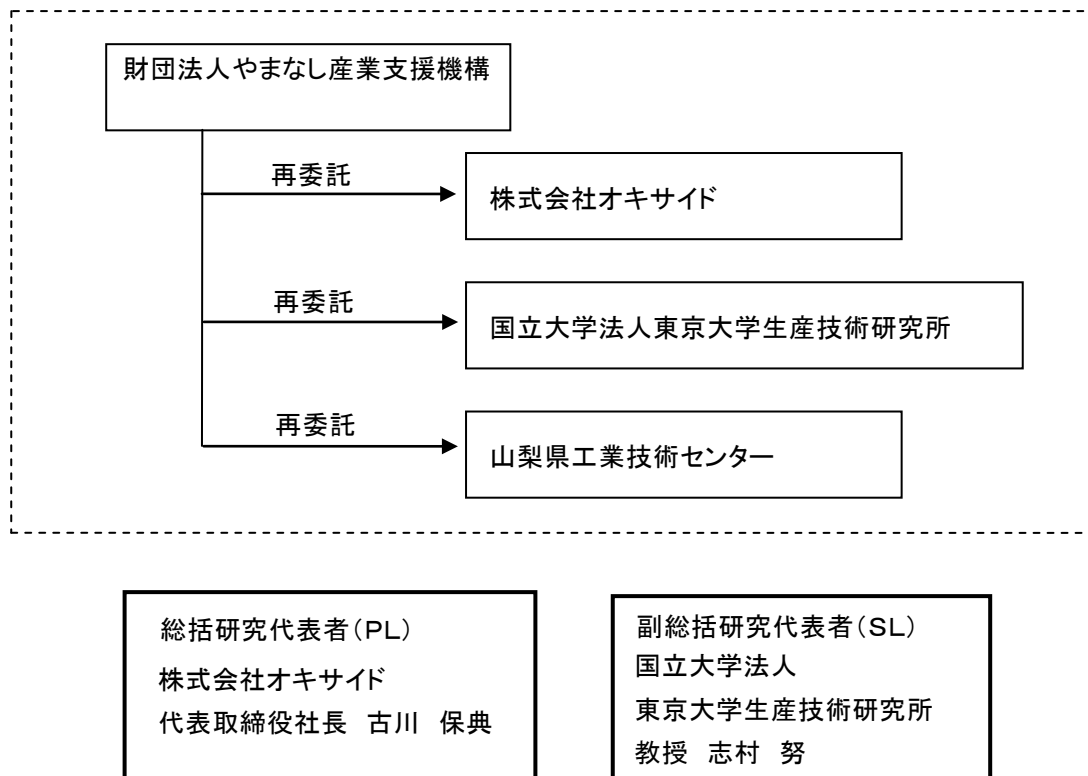
術として川下業者に提供する。本開発では、レンズ機能を有する形状可変ミラーを用いて加工用レーザーの強度分布を制御し、被加工物の加工面上でのエネルギー分布を最適化することにより、均一な微細形状加工を実現することを目的にする。形状可変ミラーとその制御技術を下記の項目により開発して、課題解決を図り、開発の終了後は形状可変ミラーを用いたレーザー加工機の実用化を目指す。

- ① 高精度・超精密加工課題への対応
 - ①－１ 形状可変ミラーの構造設計
 - ①－２ 形状可変ミラーのコーティング性能の評価
 - ①－３ レーザービーム整形性能の評価
- ② 高効率化、付加加工及び除去加工の複合化への対応
 - ②－１ ビーム形状検出機構の開発
 - ②－２ 形状可変ミラーの制御アルゴリズムの確立
 - ②－３ 制御アルゴリズムのソフトウェア化

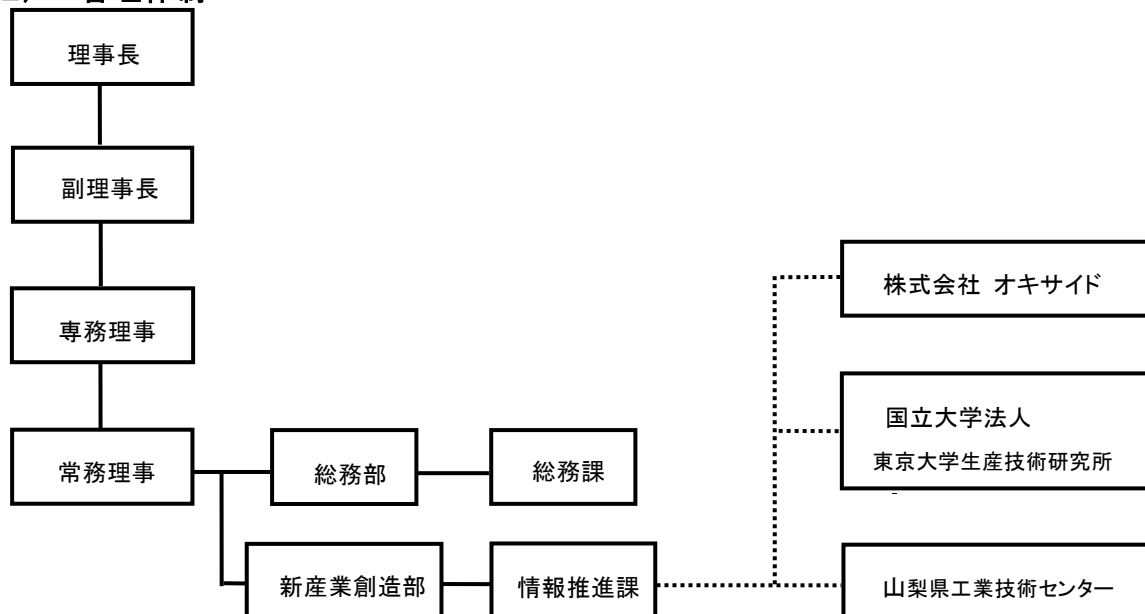
1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

(1) 研究組織(全体)

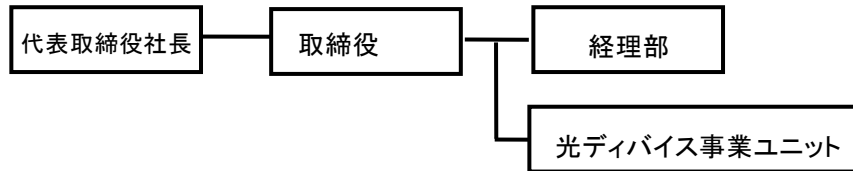


(2) 管理体制

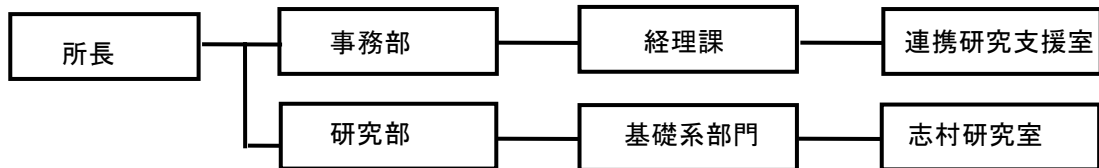


① (再委託先)

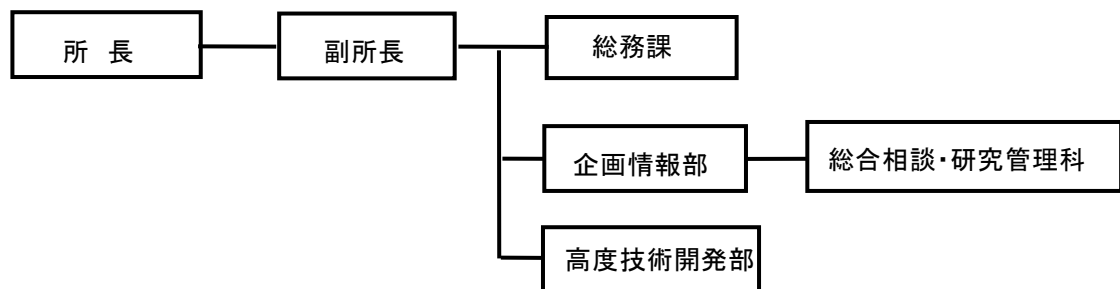
株式会社オキサイド



国立大学法人東京大学生産技術研究所



山梨県工業技術センター



(3) 研究者氏名、協力者

① 事業管理者

財団法人やまなし産業支援機構

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
廣瀬 正文	専務理事	3
山口 昭一	事務局長	3
市川 勝茂	新産業創造部長	3
天野 武志	情報推進課長	3
芹澤 速人	情報推進課主査	3

② 再委託先

株式会社オキサイド

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
古川 保典	代表取締役社長	1-2 1-3 2-3
森田 正隆	光デバイス事業ユニット主任研究員	1-2 1-3 2-3
福井 達雄	光デバイス事業ユニット研究員	1-2 1-3 2-3
廣橋 淳二	光デバイス事業ユニット研究員	1-2 1-3 2-3
時田 宏典	光デバイス事業ユニット研究員	1-2 1-3 2-3

国立大学法人東京大学生産技術研究所

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
志村 努	生産技術研究所 教授	1-3 2-3

山梨県工業技術センター

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
岩間 貴司	企画情報部総合相談・研究管理科 主任研究員	1-3 2-3
高尾 清利	高度技術開発部研究員	1-3 2-3
山田 博之	高度技術開発部研究員	1-3 2-3

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人やまなし産業支援機構

(経理担当者) 総務部総務課主査 平岡 浩

(業務管理者) 専務理事 廣瀬 正文

(再委託先)

株式会社オキサイド

(経理担当者) 経理部業務グループ 石井 千津子

(業務管理者) 取締役 山本 正幸

国立大学法人東京大学生産技術研究所

(経理担当者) 事務部経理課執行チーム 是枝 龍哉

(業務管理者) 所長 野城 智也

山梨県工業技術センター

(経理担当者) 総務課主査 中村 直樹

(業務管理者) 副所長 辻 政雄

1-3 成果概要

① 高精度・超精密加工課題への対応

①-1 形状可変ミラーの構造設計

- (i) H19 年度に、ビーム整形に最適な電極構造の試作、実証のため、各種電極パターンの基板を試作し、シミュレーションにより電極基板形状の最適選択を決定した。また、ガウシアン形状が主流のレーザー加工機に導入するリング、矩形、トップハット形状のビーム整形には 8 分割円形(ドーナツ)形状が最適と決定した。
- (ii) H20 年度には、形状可変ミラーの基板として量産性、低コスト、高品質を考慮して採用したポリマー基板が $>1000\text{Hz}$ の高速応答性のあることを実証すると共に、防塵・ノイズ保護目的の可変ミラーパッケージを完成した。

①-2 形状可変ミラーのコーティング性能の評価

- (i) 三年間かけて、コーティング技術の高性能化開発を進めた結果、最終年度(H21)において赤外線レーザー(1064nm)用では、コーティング破壊は $@7500\text{MW}/\text{cm}^2$ (100ns ; 20kHz)まで発生せず、レーザー耐性 $2000\text{MW}/\text{cm}^2$ は十分にクリアすることを実証した。一方、紫外線レーザー(355nm)用では、コーティング破壊は $@700\text{MW}/\text{cm}^2$ (10ns ; 25kHz)まで発生せず、レーザー耐性 $500\text{MW}/\text{cm}^2$ は十分にクリアすることを実証した。

①-3 レーザービーム整形性能の評価

- (i) H20 年度には、実用化を見据えたA3 サイズの可搬型コンパクトビーム整形実験装置を試作し、H21 年度には、それをさらに小型化した外形B4サイズの可搬型自動レーザービーム整形実験装置を試作した。更に当該装置をファイバーレーザーやビーム検知器等と一体化して、形状可変ミラーを搭載したファイバーレーザー加工試験機を試作した。
- (ii) また、H21 年度には、試作した前記装置を用いてビーム形状 3 種(トップハット、リングビーム、ラインビーム)の整形実験を実施し、それぞれ 1 分-3 分程度で目標ビーム整形を実現した。更に、精密レーザー加工用として波長 1064nm ファイバーレーザーの各種形状のビーム整形自動化を達成した。

② 高効率化、付加加工及び除去加工の複合化への対応

②-1 ビーム形状検出機構の開発、

- (i) H20 年度に本開発に適した検知器として高速監視用 CMOS 検出器を導入して、ビーム形状検出の性能評価を行った結果、 $>300\text{Hz}$ で超高速ビーム形状検出出来ることを実証した。

②-2 形状可変ミラーの制御アルゴリズムの確立、

- (i) H20 年度に、検出系とビーム整形光学系とを組合せた制御アルゴリズムを確立した。

②-3 制御アルゴリズムのソフトウェア化、

- (i) H20 年度に、H19 年度に調査検討した、制御アルゴリズムを形状可変ミラーの制御ソフトに組み込み遠隔操作によるビーム整形を実現した。更に、自動ビーム整形制御ソフトウェアを開発、PC の遠隔操作による 3 種類(トップハット形状、リングビーム形状、ラインビーム形状)の自動ビーム整形に成功した。
- (ii) H21 年度には、加工現場への実用化を目指し、制御アルゴリズム適正化とソフトウェアのアップグレードにより高速化(H20 年:30 分 $\Rightarrow$ H21 年:1-3 分程度)とビーム整形の高精度化(H21 年: ビーム整形によるエネルギーロスなし)を実現した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

連絡先・連絡担当者	住所
株式会社オキサイド 代表取締役社長 古川 保典	〒408-0302 山梨県北杜市武川町牧原1747-1 TEL 0551-26-0022
国立大学法人 東京大学生産技術研究所 教授 志村 努	〒153-8508 東京都目黒区駒場4-6-1 TEL 03-5452-6139
山梨県工業技術センター 高度技術開発部 研究員 高尾 清利	〒400-0055 山梨県甲府市大津町2094 TEL 055-243-6111
財団法人やまなし産業支援機構 情報推進課主査 芹澤 速人	〒400-0055 山梨県甲府市大津町2192-8 TEL 055-243-1888

第2章 本論

1 高精度・超精密加工課題への対応

1-1 形状可変ミラーの構造設計

本研究開発で用いる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関して構造の検討、設計を行った。形状可変ミラーは図1の様に可動部分である薄膜ミラーおよび薄膜ミラー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。本研究では、(1)形状可変ミラー用薄膜ミラー素材の比較検討、(2)電極基板形状の設計、(3)形状可変ミラー筐体の試作・評価、について検討を行った。

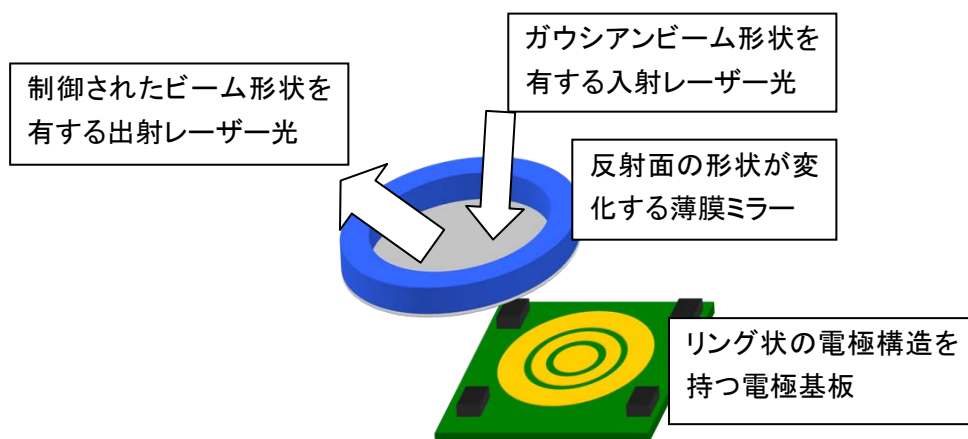


図1 形状可変ミラー構造図

(1) 形状可変ミラー用薄膜ミラー素材の比較検討

現在国内外において製品販売されている、もしくは研究論文発表された形状可変ミラー用薄膜基板素材を表1に基づいて比較検討した。その結果、これら3種類の形状可変ミラー用薄膜/薄板ミラー基板を製造現場で実際に使用することを考慮し、製造コストを低く、特に量産時にコストメリットのある素材で、かつその製造設備に多大なコストのかからないものとして、ポリマー薄膜基板を選択した。

表1 形状可変ミラー薄膜ミラー素材の比較表

	製造コスト	量産性対応	高出力対応	高速応答
① ガラス薄板基板	数 100 万円～	コストが高い (手作業で製造)	○	最大数kHz
② SiN 薄膜基板	数 10 万円～ 数 100 万円	コストが高い (専用製造設備が必要)	△	最大1kHz
③ ポリマー薄膜基板	数 万円～10 数 万円	コストが低い (既製のペリクル使用)	○	最大1kHz

ポリマー薄膜基板は、レーザー計測装置のビームスプリッターや半導体製造装置のマスク製造、検査装置のマスク面を埃などから保護する目的のペリクル基板として入手が可

能であり、量産性に優れ、安定した品質が得られる、等のメリットがある。本研究で採用した薄膜ニトロセルロース基板の主な材料仕様は以下の通り。

・ポリマー薄膜基板(ニトロセルロース製ペリクル基板)

直径	: 1インチφ
ミラー薄膜厚さ	: $2\mu\text{m}$ と $5\mu\text{m}$
ミラー薄膜張力	: 標準張力と高張力ポリマー薄膜基板の仕様
波面精度	: $\lambda/2$ per inch (波長 633nm において)

形状可変ミラーの自動制御に適したポリマー薄膜ミラー基板では、高速応答性能を有することが重要である。すなわち、形状可変ミラーを使用したビーム整形を実現するには、一般的な加工レーザーのエネルギー分布であるガウシアンビーム形状から目標のビーム形状、例えば、トップハットビーム形状に整形を行うためにはミラー面で反射されるレーザービームのエネルギー分布が適切になるよう、電極基板をそれぞれ適切な電圧に制御しなければならない。それを実現するため、ミラー面で反射されるビーム形状を計測しそれぞれの電極への印加電圧を制御し、それを繰り返し行うことで達成される。コンピュータによるシミュレーションでは、1000 回以上の制御操作を行わなければならない、従って、これらの操作を高速に実行するためにはポリマー薄膜ミラーを高速で安定動作させる必要がある。数分から 10 数分程度でプロセスが完了することを目標とし短時間で達成するために 1000Hz の応答性能を目標値とした。

図2に 4 種類の異なる条件(厚さ $2\mu\text{m}/5\mu\text{m}$ と標準張力/高張力)のポリマー薄膜に関する周波数応答特性測定結果を示す。図2のグラフにあるように、標準張力で $5\mu\text{m}$ 基板の場合、500Hz 以上で形状可変ミラーの面制御に歪が発生しフォトダイオードで検出される出力に低下が見られ、高張力の厚さ $5\mu\text{m}$ 基板の場合 1000Hz を超すまでフォトダイオードの検出出力は安定しており、それ以上では出力の低下が起こることが確認された。それぞれポリマー薄膜基板は厚さと面張力により異なる共振周波数を有する。この実験から $5\mu\text{m}$ で高張力な基板が形状可変ミラーの高速化に適した基板であること確認できた。

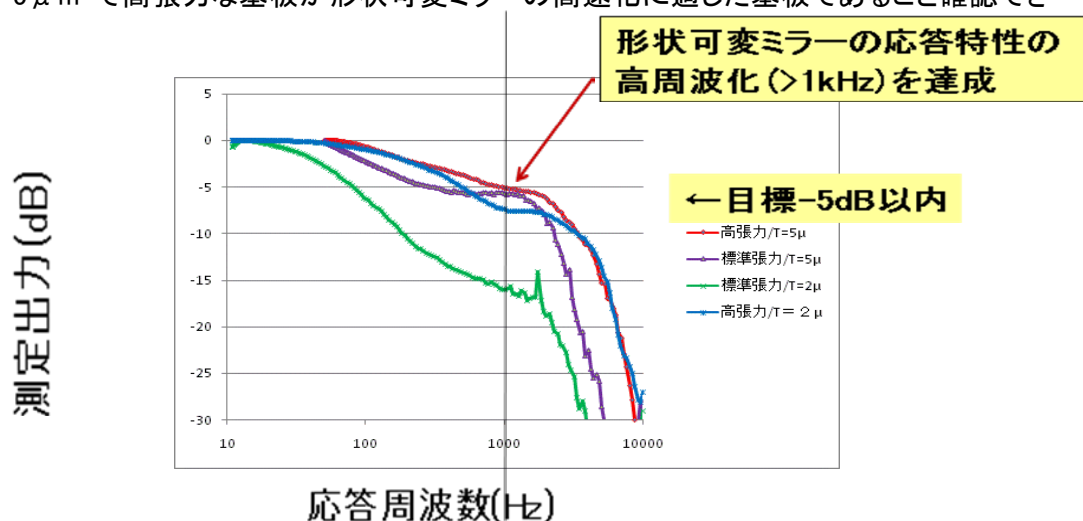


図2 4種類の異なる張力のポリマー薄膜の周波数応答特性

(2) 電極基板形状の設計

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。①入射ビーム形状に対し適切な形状可変ミラー面の制御を行える電極配置がされていること。②反射面であるポリマー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。コンピュータシミュレーションによる Influence Function 実験等により検討した結果、レーザー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いる場合、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、且つ放射方向に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。その結果をベースにより精密な制御を行うことを考慮して、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 個の電極構造を最終決定した。

新型形状可変ミラー33ch電極構造

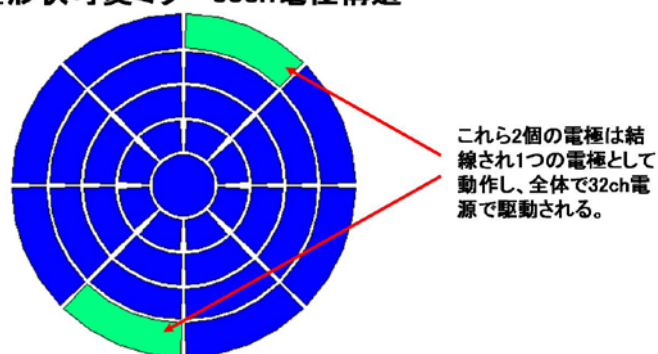


図3 32ch 電極基板

(3) 形状可変ミラー筐体の試作・評価

形状可変ミラーは、ソフトな薄膜ポリマー基板を使用しているために外部環境の空気振動の影響を受けやすい、更に電極基板部の端子が外部からの電磁ノイズの影響を受けやすい。よって、レーザー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外部環境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。設計の際に以下点を考慮した。

- ・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した。
- ・筐体の光学調整を考慮して、マウント部に光学ミラーマウントを直接取り付け付けた。

試作した形状可変ミラーの筐体パッケージを図4に示した。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、安定動作をすることが確認できた。

1-2 形状可変ミラーのコーティング性能の評価

形状可変ミラーを最新の高出力パルスレーザー加工機のエネルギーに適応させるため、50W 級赤外パルスファイバーレーザーの高出力エネルギーに耐える反射コーティング膜の開発、評価実験を行うとともに、ビーム整形性能に与える熱歪の影響の評価とその対策を目標に開発を行った。反射コーティング膜の開発は反射率の向上と熱影響の低減を



図4 開発の筐体パッケージ

目的とし、50W のファイバーレーザーを使用した破壊耐性および熱影響の評価を目的に実験を実施した。また、紫外線レーザー発振器 (355nm レーザー; 1W) を使用し、紫外線レーザー用反射膜の信頼性および熱影響の評価実験も合わせて実施した。三年間にわたって行ったコーティング性能向上の変遷を表2に示す。

表2 各年度のコーティング性能目標と実績

	H19年度			H20年度			H21年度目標	
	仕様	反射率 (設計値) 目標値	ダメージ MW/cm2 目標値	仕様	反射率 (設計値)目標 値	ダメージ MW/cm2 目標値	反射率 (目標 値)	ダメージ MW/cm2
赤外レーザー用 ミラーコーティング	Al+ 保護コート	97% (>99%)	0.4 (>500)	Au+誘電体 多層膜	99.7% (>99.5%)	<1000 (>1000)	>99.9%	>2000
	Ag+誘電体 多層膜	99% (>99%)	900 (>500)	Ag+誘電体 多層膜	99.8% (>99.5%)	>1000 (>1000)		
紫外レーザー用 ミラーコーティング	開発実験は実施せず			Al+誘電体 多層膜	98% (未設定)	計測せず (未設定)	>99.5%	>500
				Ag+誘電体 多層膜	97%	計測せず (未設定)		

以上の結果、最終的に確立したコーティング膜は、以下の通りである。

＜赤外線レーザー用＞

試作仕様

コーティング基板: ニトロセルロース製ポリマー基板 5 μ m 厚(高張力基板)

コーティング仕様: 銀蒸着基板の上に誘電体多層膜(酸化 Hf+SiO₂) 4-6 層

反射率 >99.9% @ 1064nm

レーザー損傷耐圧 >2000MW/cm²

反射膜の基本設計は銀蒸着ミラーベース上に誘電体多層膜(Enhanced Coating Layers)を施した反射コーティングとした。コーティング膜の反射率向上は、銀蒸着層と Enhanced Coating Layer 層の接合条件の最適化を行い以下の性能が達成された。本年度目標の 50W レーザーへの使用を考慮し、99.9%とした、また、ダメージ閾値の目標設定は 20W ファイバーレーザーのパルスエネルギーの尖頭値(2000MW/cm²; 1mJ、20kHz、100ns)より算出した。(50W レーザーは高繰り返しレーザーの為、エネルギーの尖頭値は 20W ファイバーレーザーの方が高い)

＜紫外線レーザー用＞

試作仕様

コーティング基板: ニトロセルロース製ポリマー基板 5 μ m 厚(高張力基板)

コーティング仕様: アルミ蒸着基板の上に誘電体多層膜 4-6 層

反射率 >99% @ 355nm

レーザー損傷耐圧 >500MW/cm²

(A) 赤外線レーザー用コーティングのダメージ評価実験

最終的に試作した銀蒸着+誘電体多層膜コーティングは 50W 照射後コーティング膜の破壊や剥離等の目視によるダメージは確認されず、耐性を有することが実証された。又、パルスレーザーのピークエネルギーに対する耐性テストでも 2000MW/cm² のレーザー照射パワーに耐えることが実証された。さらに集光密度を上げ、1.5mm ϕ でエネルギー密度が約 7500MW/cm² に達したときに初めて、集光部分のポリマー基板よりコーティングの剥離が発生、ダメージが観測された(写真1参照)。



ダメージなし

照射パワー(ピークエネルギー値)
2000MW/cm²



ダメージ発生(レーザー入射面)
金属コーティングにクラック発生

7500MW/cm²

写真1 誘電体多層膜コーティングのダメージ評価実験結果

(B) 赤外線レーザー用コーティングの熱歪特性の評価実験

ポリマー基板を使用する形状可変ミラーにおいて、高出力なレーザービームの照射により、発生する形状可変ミラー面の熱歪を評価した結果を図5と図6に示した。評価は、形状可変ミラーにファイバーレーザーの強力なレーザービーム(照射ビーム径 15mm φ)を照射し、HeNe レーザーを計測光源としビームを形状可変ミラー面に照射し、数ナノメートルの分解能を有する波面計測装置で計測した。図5は形状可変ミラー面にレーザー照射した時の位相波面変位を波面検出装置で計測した波面歪グラフである。図中には計測された面歪のカラーチャート図を挿入した。図6はレーザー照射を停止し、波面が安定した時の残留熱歪を計測したグラフである。

照射レーザービームのエネルギーによる可変ミラー面の波面歪は、図5に示すように低出力(10W 以下)ではサンプルによるばらつきは若干あるものの影響は小さく、高出力(5-18.9W)まではエネルギーに比例し拡大するが、可変ミラーの制御による補正可能範囲(波面歪値が 200nm 以下)であることが実験結果より得られた。一方、図6に示す通りレーザービームの照射を停止することで波面歪はほぼ平坦に復帰することから照射エネルギーに起因する熱歪と判断できる。これら実験結果から本年度試作したコーティングは、15W クラスの高出力パルスレーザーのパルスエネルギーに対し、十分なビーム整形性能を有することが実証され、又 50W ファイバーレーザーの入射エネルギーに対しても破壊することなく耐えることが実証された。

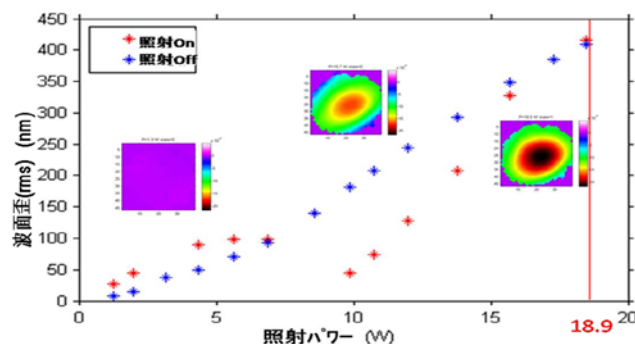


図5 赤外線レーザー用コーティングの熱歪

レーザー照射による熱歪1064nm

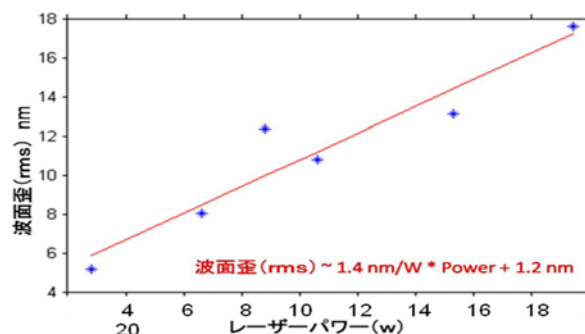


図6 赤外線レーザー照射による熱歪

(C) 紫外線レーザー用コーティングのダメージ評価実験

紫外線レーザー用コーティングに対しても赤外線レーザー用コーティングと同様の耐性評価実験を実施した。目標である $500\text{MW}/\text{cm}^2$ 以上のダメージ耐性の確認のため、微細加工レーザー装置(1W)のレーザービームをレンズで直径 2.0mm に絞り、コーティングを施した形状可変ミラー基板面に照射しダメージ評価を行った。

ダメージ評価実験の結果を写真2に示した。最終仕様により試作したアルミ蒸着+誘電体多層膜コーティングは目標である $500\text{MW}/\text{cm}^2$ のレーザー照射パワーに耐えることが確認され、本開発の目標とする 1W 級微細加工レーザー装置用のビーム整形実験に使用できることが実証された。本コーティングの破壊閾値を検証するため、さらに集光密度を上げ、1.0mm φ でエネルギー密度が約 $2000\text{MW}/\text{cm}^2$ に達したときに初めて写真2に見られるように、形状可変ミラー膜が破裂し、ダメージが確認された。



ダメージ発生前($500\text{MW}/\text{cm}^2$)

ダメージ発生後($2000\text{MW}/\text{cm}^2$)

写真2 誘電体多層膜コーティングのダメージ評価実験結果

(D) 紫外線レーザー用コーティングの熱歪特性評価実験

紫外線レーザー用形状可変ミラーについても、赤外線用形状可変ミラーと同様の熱歪特性の評価実験を行った。波長 355nm の微細加工レーザーのレーザービーム(照射ビーム径 6mm φ)を照射し、計測用 HeNe レーザーを形状可変ミラー面に照射し、その反射光を数ナノメートルの分解能を有する波面計測装置で計測した。微細加工レーザーの照射パワーを 0.0W から 1.1W まで制御し、波面計測装置の解析ソフトウェアで面歪の解析を行った。熱歪特性の評価実験結果を図7に示した。

図7に示すように 1.1W 照射時には 200nm(rms)以上面歪が測定され、レーザー照射を停止直後に 140nm(rms)となり、更に 5 分ほど放置後 20nm(rms)程度の面歪まで戻ることが確認された。この 20nm(rms)程度の面歪であれば、形状可変ミラーの電圧制御により補正可能な範囲であり、使用上問題はない。

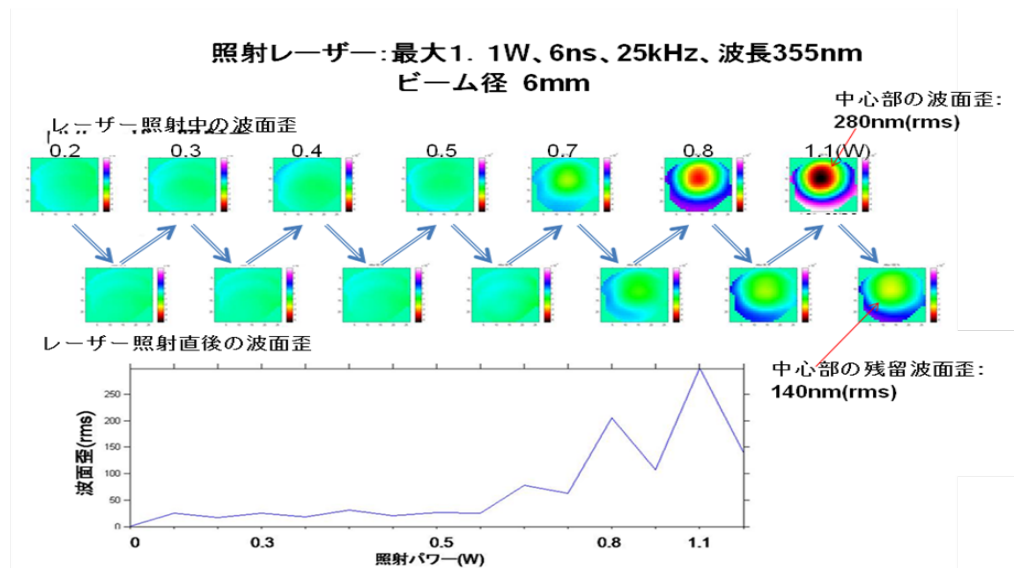


図7 紫外線レーザー用コーティング熱歪評価実験

1-3 レーザービーム整形性能の評価

(1) ビーム整形法

レーザー加工機や理化学用レーザー発振器の出力ビームの強度分布形状を目的の形状に制御するには、強度位相変調と空間位相変調の2つの方法がある。強度位相変調はレーザー光を拡大しマトリックスに分割されたそれぞれの部分を変調器で個別に制御し、目的とする強度分布形状を構築する。この場合、レーザー光のエネルギーが大きく損失される。しかし、形状可変ミラー等を使用した空間位相変調法でエネルギー分布の再配置を行う場合、エネルギーの損失が最小限になり、効率的な方法である。

本研究開発は産業用レーザー加工機のレーザー光形状であるガウシアン形状から加工応用に重要な図8に示すような4種類のビーム形状(トップハット丸、トップハット矩形、リング丸、リング矩形)へビーム整形をすることを目標とした。このようなビーム整形を行うために、ラプラス解析(地形など位相変化を数学的な解析評価する法)により、エネルギー強度分布の再配置を解決する計算を行った。

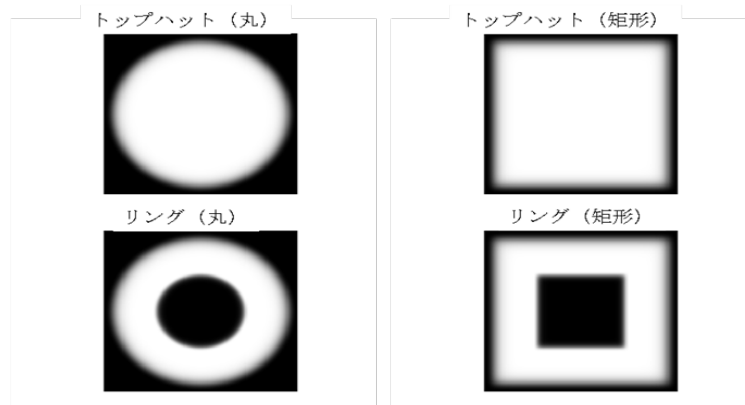


図8 4種類の加工レーザービーム形状

(2) ビーム整形性能の評価方法と装置

本開発で試作したビーム整形実験装置のレイアウト模式図およびビーム整形性能評価実験装置を図9および写真3に示した。図9および写真3に示すように、ビーム整形装置は B4 サイズ(300x400mm)以下のサイズに縮小設計し、堅牢な実験用架台上にファイバーレーザーと同一面上に搭載できるようにした。

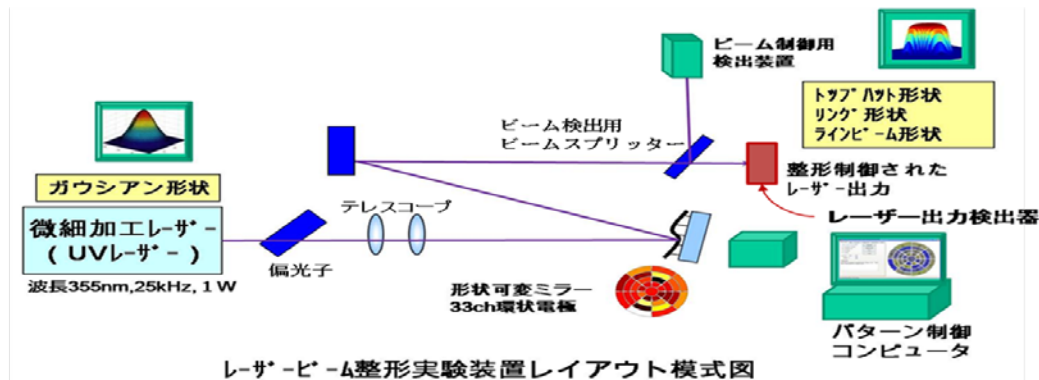


図9 ビーム整形実験模式図

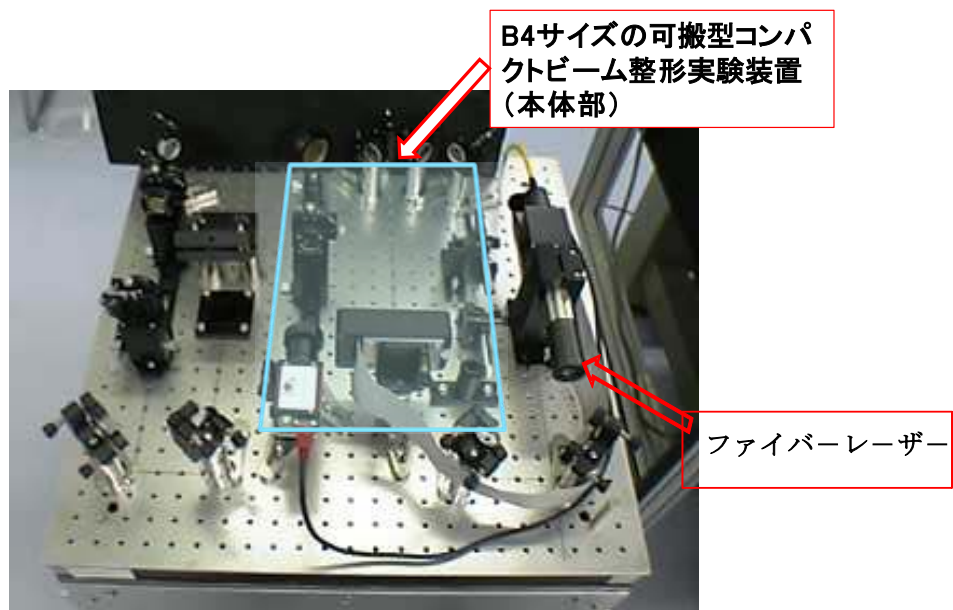


写真3 ビーム整形実験装置写真

ビーム整形性能の評価実験装置は、図9に示すようにガウシアンビーム形状を有するファイバーレーザー発振器、レーザー装置の直後に設置したビームエキスパンダー光学系(2X)、形状可変ミラーとビーム検出器を組み込んだビーム整形装置部、ビーム広がり補正用光学系、加工光学系、および制御コンピュータにより構成されている。トップハットビーム形状、リングビーム形状およびラインビーム形状へのビーム整形実験をコンピュータで遠隔操作により自動制御し実施した。最終試作した実験装置は、写真3に示す。本研究開発では、この実験装置の設計の際、後付け型コンパクトビーム整形装置の設計を行

い、B4程度のコンパクトなビーム整形装置に組み上げることが製作可能であることを実証出来た。図10および写真4に今回試作したファイバーレーザーとビーム整形実験装置を一体化した装置の全体写真と同装置を用いたファイバーレーザー加工装置の光学系を模式的に示した。この装置は、電子部品など微細切削穴あけの場合に加工を低価格で実現するコンパクトなビーム整形レーザー加工装置を目指している。

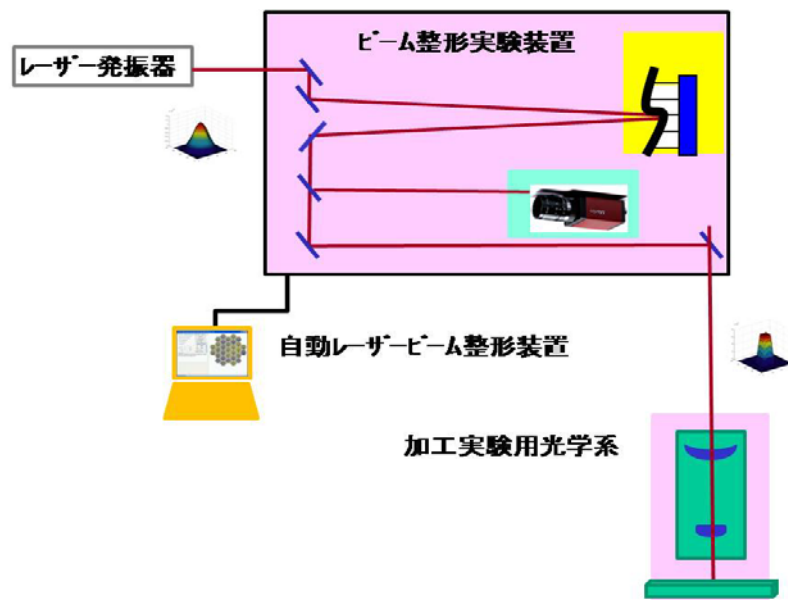


図10. ファイバーレーザー加工装置光学系



写真4 ビーム整形加工実験装置

(3) ビーム整形実験結果

ビーム形状の自動整形制御実験の結果を図11－図13に示す。以下に今回実験対象としたトップハットビーム形状、リングビーム形状とラインビーム形状等のビーム整形実験の結果について簡単に述べる。

図11は、トップハットビーム形状の自動整形制御の制御結果をまとめたものである。本実験では下記のように約1分ほどでビーム整形が完了した。その後、安定状態までさらに1000-2000 回の繰返しフィッティングを行い、2 分ほどで最良値まで到達した。

$$\begin{array}{lcl} \text{ビーム計測とフィッティング計算} & \times & \text{繰返し回数} \\ 30\text{ms} & \times & 2000 = 1\text{分} \end{array}$$

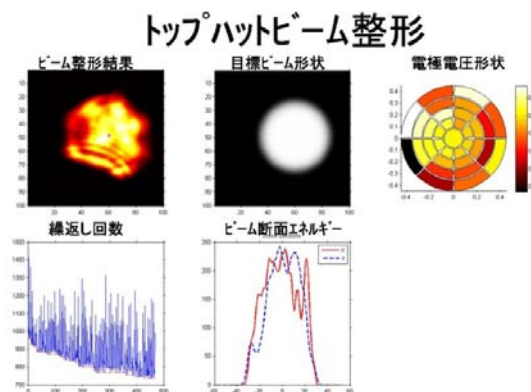


図11 ビーム整形実験(トップハット)

図12は、リングビーム形状の自動整形制御の制御結果をまとめたものである。実験装置の光軸調整は上記と同様に行った。実験では GESA アルゴリズムを使用した場合、下記のようにおよそ 30 秒でビーム整形が収束し、さらに 30 秒ほどで最良値へ安定し完了した。

$$\begin{array}{lcl} \text{ビーム計測とフィッティング計算} & \times & \text{繰返し回数} \\ 30\text{ms} & \times & 1000 = 30\text{秒} \end{array}$$

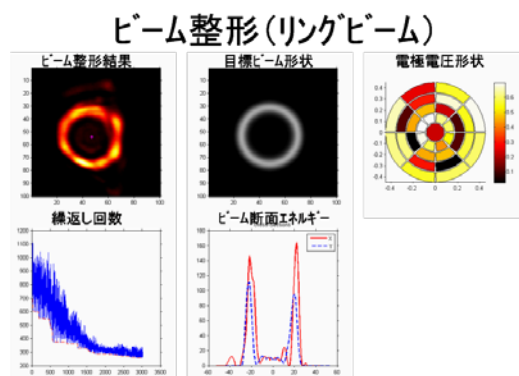


図12 ビーム整形実験(リングビーム)

図13は、ラインビーム形状の自動整形制御の制御結果をまとめたものである。実験では下記のようにおよそ 30 秒でビーム整形が完了し、さらに 1 分ほどで最良値へ収束しビーム整形を完了した。

$$\begin{array}{l} \text{ビーム計測とフィッティング計算} \times \text{繰り返し回数} \\ 30\text{ms} \qquad \qquad \times 1000 \qquad = \qquad 30 \text{ 秒} \end{array}$$

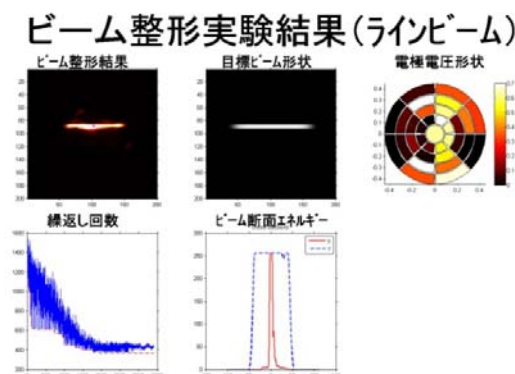


図13 ビーム整形実験(ラインビーム)

(4) レーザー加工評価

本開発で試作した形状可変ミラーを組込んだビーム整形加工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、被加工物の加工面状態及び形状をレーザー顕微鏡を用いて観察・計測することにより行い、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による加工状態を比較し、ビーム整形技術を加工応用に利用する可能性を検証した。

レーザー加工実験に使用したファイバーレーザー加工装置光学系を図14に、写真5に加工中のビーム整形レーザー加工実験装置の写真を示す。また、本加工実験を行ったサンプルは4種類(ステンレス基板、ポリイミドフィルム、アルミナセラミック基板、アルミ基板)である(写真6参照)。

今回加工実験を行ったサンプルは4種類であるが、以下述べるようにステンレス基板の加工において本形状可変ミラーによるレーザー加工適用の優位性が実証出来たが、それ以外の材料基板では加工条件の最適化ができず、本形状可変ミラーによるレーザー加工適用の優位性を判定するまでには至らなかった。

(A) ステンレス基板(SS400)

ステンレス基板は、アルミに比べ組成に鉄を含むことから $1\mu\text{m}$ での吸収が大きく、また、熱伝導率は高くない。よって、レーザー加工に向いた材料であり、レーザー加工機を使用したステンレス基板の微細レーザー切断加工は広く行われている。本加工実験では出力 10W で加工用精密ステージの移動速度をそれぞれ 50mm/sec、20mm/sec、10mm/sec で加工実験を行った。加工状況は下記のアルミ基板等の他のサンプルに比べ、明確な加工がされていることが目視で確認できた。

図15に、ステンレス基板の加工状態をレーザー顕微鏡により観察した結果を示す。被加工物の移動速度が10mm/secの場合、トップハット形状に整形したビームによる加工では、加工深さが5~7 μm 程度、ガウシアンビーム形状による加工深さはおよそ10 μm 程度であった。これは、ビームのエネルギー分布がガウシアンビームの方が中央値が高いためである。図15にビーム整形加工実験装置のビーム形状、と加工サンプルの加工面の顕微鏡写真の加工部分の拡大写真を示す。この観察結果から溝加工形状は加工レーザーのエネルギー形状に依存し、トップハットビーム形状の加工ビームで加工した場合、溝底部の形状が平坦になすことが確認された。これは当初研究開発開始時に目標想定した結果である。今後、本研究開発成果を川下加工業者に提供し、レーザー加工装置メーカーの開発者や先端技術を有するジョブショップなどで豊富な経験を持ったエンジニアによる詳細な加工実験により、高度な加工技術として確立していく予定である。

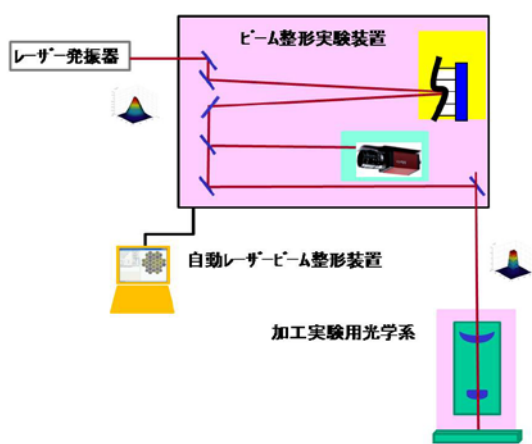


図14. レーザー加工装置光学系

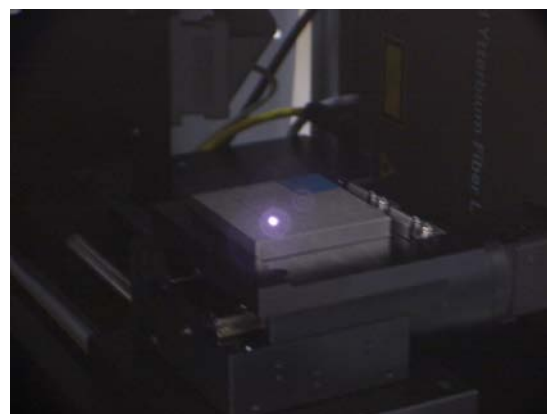


写真5 ビーム整形加工実験装置の加工写真



アルミナセラミック基板



ポリイミドフィルム

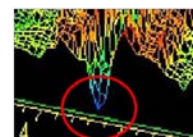
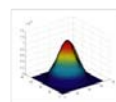


アルミ基板



ステンレス基板 (SS400)

ガウシアンビーム形状



トップハットビーム形状

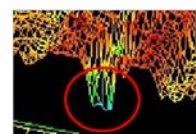
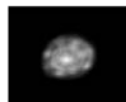
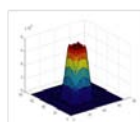


写真6 加工実験のサンプル基板

図15 レーザー顕微鏡による加工状態観察結果

(B) ポリイミドフィルムの加工実験

ポリイミドフィルムは、最新の電子部品用積層基板の材料として使用されている有機材料である、ポリイミドは $1.06\mu\text{m}$ の波長で吸収が大きな材料である。そのため、最初にレーザー出力 10W で 50mm/sec にて加工実験を行ったが加工面は瞬時に溶けてしまった。その後、レーザー出力を 1W に低減し、同様に加工実験を行った。しかし、精密部品に適用できるようなきれいな加工面は得られなかった。通常、ポリイミドフィルムは積層基板などの材料に使用され、紫外線レーザーによる微細加工実験の実施を予定していたが、今回は微細加工レーザー (355nm) を光源とした加工実験が行えなかった。再度、この実験を実施する予定である。

(C) アルミナセラミック基板の加工実験

アルミナセラミック基板は、本加工実験で使用するレーザーの波長 (1.06nm) では反射率が高く、熱伝導率が高いので非常に加工しにくい材料である。今回、加工速度を 50mm/sec、20mm/sec、10mm/sec にて加工実験を行った。一番遅い 10mm/sec の場合でも、加工面に一切変化が見られなかったことから、レーザー出力が低すぎるか発振波長の異なるレーザーでの加工が必要と推察された。

(D) アルミ基板 (A2017P) の加工実験

アルミ基板は、熱伝導率が非常に高く、可視光や近赤外光に対し高い反射率を持ち、レーザー加工の難しい材料である。今回、レーザー出力 10W で移動速度を 50mm/sec、20mm/sec および 10mm/sec で加工実験を行った。しかしながら、上記のアルミナセラミック基板と同様に加工面に変化が見られず、レーザー出力が低すぎるか発振波長の異なるレーザーでの加工が必要と推察された。

2 高効率化、付加加工及び除去加工の複合化への対応

2-1 形状可変ミラーの制御用検出装置の開発

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 以上と設定した。この目標に基づいて本研究開発で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ってしまう。そこで、近年、入手可能になった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高速度カメラを入手し、画像検出速度を計測した。写真7に本開発で導入した高速ビーム形状検出器を示す。この高速ビーム形状検出器を用いて、二種類の異なるOSを持つパソコン (HP-PavillionとDell-Vostro) にて受光素子数の制御と画像取り込み速度の比較評価を行った結果、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 (fps:frame per second) が 300fps から 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みみやカバーガラスの取り外しを行い、本開発目的に合った高速ビーム形状検出装置を完成させた。



写真7 高速ビーム形状検出器

2-2 形状可変ミラーの制御アルゴリズムの確立

・最適化アルゴリズムの検討

本プロジェクトで行うビーム整形では、入力レーザーの波面に形状可変ミラーで位相変調を加え、集光ビームスポットの形状を制御する必要がある。このとき、集光ビームの強度分布をモニターしながら形状可変ミラーの形状を変化させ、フィードバック制御により徐々に目標のスポット形状に近づけていく。ここで問題になるのが、フィードバック制御の方法である。このフィードバック制御に用いる最適化アルゴリズムに関する検討結果を以下に述べる。

(1) 系の構成

本研究開発のビーム整形光学系の概要を図16に示す。レーザー発振器から出たビームは、ビーム拡大光学系により広げられ、可変形状ミラーで反射される。反射されたビームは形状可変ミラーの形状に応じた位相変調を受け、空間伝播、レンズ通過、再び空間伝播の後、目標面(レーザー加工の場合は被加工物面)に達する。

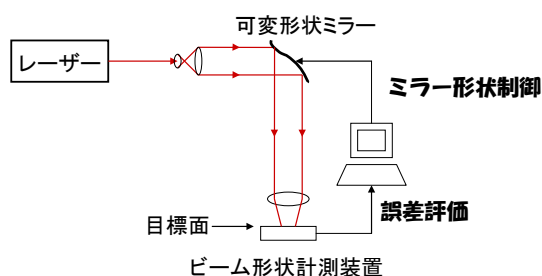


図16 形状可変ミラーを用いたビーム整形システムの概要図

目標面でのビームの強度分布は、CCD カメラあるいは C-MOS カメラ等の撮像素子を用いて計測する。これをコンピュータに取り込み、目標となる形状との誤差を評価する。図17に模式的な例を示す。実線が測定された実際のビーム形状、破線が目標とするビーム形

状である。誤差に基づき評価関数を設定し、この評価関数を最小化するようフィードバック制御を行う。



図17 目標とする強度分布(破線)と計測された光強度分布(実線)の模式図。

コンピュータからは、形状可変ミラーの各電極への印加電圧値が出力される。この印加電圧値に基づく印加電圧ベクトルを制御変数として変化させて、評価関数を最小化する必要がある。この評価関数は印加電圧ベクトルの関数となる。このときに使用する最適化アルゴリズムにはさまざまなものがありうるが、本開発では GESA および SPGD のアルゴリズムを採用した。

形状可変ミラーは、上記各電極の印加電圧に応じて鏡面の形状が変化する。従って、制御アルゴリズムは、コンピュータで作り出す任意の形状パターンにおける印加電圧ベクトルと集光されたビームスポットの強度分布の関係のみを用い、最適なスポット形状を与える印加電圧ベクトルを求めることになる。

(2) 制御アルゴリズムの流れ

本研究開発で構築しようとしているシステムでは、所望の形状の集光ビームスポットを、(1)高速、かつ(2)安定、に制御することを目的としている。いかに精密にスポット形状が制御されても、そのための演算に時間がかかっては目的が達せられない。そこで下記のような4段階の制御手順を踏むこととした。

.....

注2: GESA = Guided Evolution Simulated Annealing; 遺伝進化型アルゴリズム。
ランダムパターン内で親と子を設定し、その中から最良値の位置を新しい親とし、新たな領域内にランダムなパターンをその親を中心に複数の子の位置を設定し、徐々に領域を狭め、収束する)

SPGD = Stochastic Parallel Gradient Descent; ランダムなパターンでの比較により、目的の形状へ漸進、ビーム整形を完成させる。

- ① シミュレーションによる初期制御変数の決定
- ② 実際の光学系でのフィードバック制御による静的制御変数の決定
- ③ 個別システムに対する静的制御変数の最適化
- ④ 個別システムの動作中の変動に対する安定化

以下に各段階の具体的な内容について説明する。

① シミュレーションによる初期制御変数の決定

まず、第1段階として回折計算による数値シミュレーションにより、印加電圧ベクトルを決定する。これは以下の実際の光学系での制御での初期値を求めるためのものである。最適化プログラムの収束速度および最終到達解の良否は、初期値に大きく依存することが知られている。数値解による粗い近似解を初期値とすることで、以後の最適化プロセスの高速化が図ることができると期待される。

まず、印加電圧ベクトル $\mathbf{V}$ と形状可変ミラーがレーザービームに与える波面の変調をごく粗い近似で与える。あくまで初期値の設定のためと割り切れば、このような粗い近似でも十分に意味がある。

次に、このような近似で形状可変ミラーがレーザービームに与える位相分布が決まったら、今度は、そこから目標面までの光波の伝播を計算することになる。形状可変ミラーと目標面までの間にレンズが1枚置かれた、最も単純な光学系を考えると、まず形状可変ミラーからレンズまでの回折計算、次いでレンズによる位相付与、さらにもう一度レンズから目標面までの回折計算を行う。

本開発で行うことは、形状可変ミラーの形状を、印加電圧ベクトル $\mathbf{V}$ を制御変数として変化させ、集光面での光強度分布 $I_2(x_2, y_2)$ を設定した強度分布 $I_g(x_2, y_2)$ に近づける、ということになる。集光面での光強度分布 $I_2(x_2, y_2)$ は、

$$I_2(x_2, y_2) = c_0 |u_2(x_2, y_2)|^2 \quad (1)$$

となっている。ただし、 c_0 は定数である。ここで誤差の最小2乗和、

$$R \equiv |I_g(x_2, y_2) - \alpha I_2(x_2, y_2)|^2 \quad (2)$$

を評価関数として定義し、 R を $\mathbf{V}$ の関数として、 R が最小となる $\mathbf{V}$ を探索する。ここで α は規格化定数であり、

$$\alpha = \frac{\max[I_g(x_2, y_2)]}{\max[I_2(x_2, y_2)]} \quad (3)$$

R が最小値をとる $\mathbf{V}$ の探索法に関しては最適化アルゴリズムを用いる。ここまでで、実際の実験光学系で用いる $\mathbf{V}$ の初期値が求まることになる。

② 実際の光学系でのフィードバック制御による静的制御変数の決定

前節で述べた手順により印加電圧ベクトル V の初期値が求まったら、次に実際の実験系でのフィードバック制御を行ない、所望の $I_g(x_2, y_2)$ に実際の集光面での光強度分布 $I_2(x_2, y_2)$ を近づけていく。ここでは $I_2(x_2, y_2)$ は実際の計測値である。最終的な加工機では、加工ビームの一部を低反射率の平面鏡でサンプルし、集光面の共役面で強度分布をモニターすることになる。

式(2)の評価関数を用い、前節で述べたのと同じ方法で R が最小値をとる V の探索を行う。最適化アルゴリズムは大局的最適化に適したものを採用し、少々時間がかかっても、局所的極小点 (local minimum) に捕らわれることのないよう留意する必要がある。

ここで得られた V は、同一光学系によるシステムならば、目標形状 $I_g(x_2, y_2)$ に対して一意に決まるので、データベース化しておき、次の段階での加工機一つ一つの微小な個体差に対応した精密制御の初期値として使用する。また、長方形や楕円スポットなどで、データベースに無い形状のスポットを作る場合には、その際の最適化の初期値として使用することもできる。

③ 個別システムに対する静的制御変数の最適化

全く同一仕様のレーザー加工機システムでは、理想的にはすべて同じ V で同じ $I_2(x_2, y_2)$ が得られるはずである。しかし当然ながら、微妙な個体差があるため、 V を精密制御することにより、より目標形状 $I_g(x_2, y_2)$ に近いスポット形状 $I_2(x_2, y_2)$ を得ることができ。考えうる個体差には、

- ・ レーザービームの波面形状
- ・ 形状可変ミラーの印加電圧ベクトルと形状の関係の個体差
- ・ レンズの焦点距離等の部品の仕様のばらつき
- ・ 光学系の組み立て誤差
- ・ 使用環境の違い

などがある。これらに対応するため、レーザー加工機一機ごとに V の値の追い込みを行う。

ここでも最適化の手順は前節までと同じだが、使用する最適化アルゴリズムには、大局的な探索機能は要求されず、むしろ高速性、正確性、安定性、が求められる。そのために最適なアルゴリズムを選択する。

④ 個別システムの動作中の変動に対する安定化

前節までの手順で、所望のビームスポット形状が得られ、レーザー加工を始めることができる。しかし、動作中に系の状態は変化し、ビームスポット形状が揺らいでしまうことが考えられる。原因としては、

- ・ レーザービームの波面の揺らぎ
- ・ 環境温度の変動
- ・ 空気の揺らぎ

等がありうる。この変動を抑えるために、加工中も常にフィードバック制御をかけ続けることは効果が大きいと考えられる。ただし、制御は前節に述べたものよりもさらに高速に行う必要がある。基本的にはビームの重心の移動の検出と制御、強度分布のずれと最適化分離し、かつ同時に進行させることで、高速化を図ることができると考えられる。

2-3 制御アルゴリズムのソフトウェア化

本研究開発で目標とする自動ビーム整形制御は、前節で述べたように入力レーザーのビーム形状の計測、目標のビーム形状と入力レーザー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を最小になるようにすることである。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18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スクリーン画面の一例を示した。

この制御アルゴリズムのソフトウェア化において、自動制御を効率的に行う制御アルゴリズムとして 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。

更に、この自動ビーム整形制御ソフトウェアの高速化、ビーム整形効率の向上、および操作性の向上を目的に改良を行った。以下その主な改良ポイントについて簡単に述べる。

① 制御用コンピュータの高速化によるビーム形状検出器の画像取込速度の向上。

制御に使用するコンピュータの演算速度の向上により高精細な画像(画素数 300x400 素子)の場合で同様の300Hz を達成し、スムーズなビーム整形制御を実現。

② 取込同期信号による処理速度の向上。

- ・ ビーム検出器の画像信号通信の同期を可能にした、カメラドライバーの改良によるビーム整形実験により処理速度が向上した。従来、画像取込エラーを補うために10

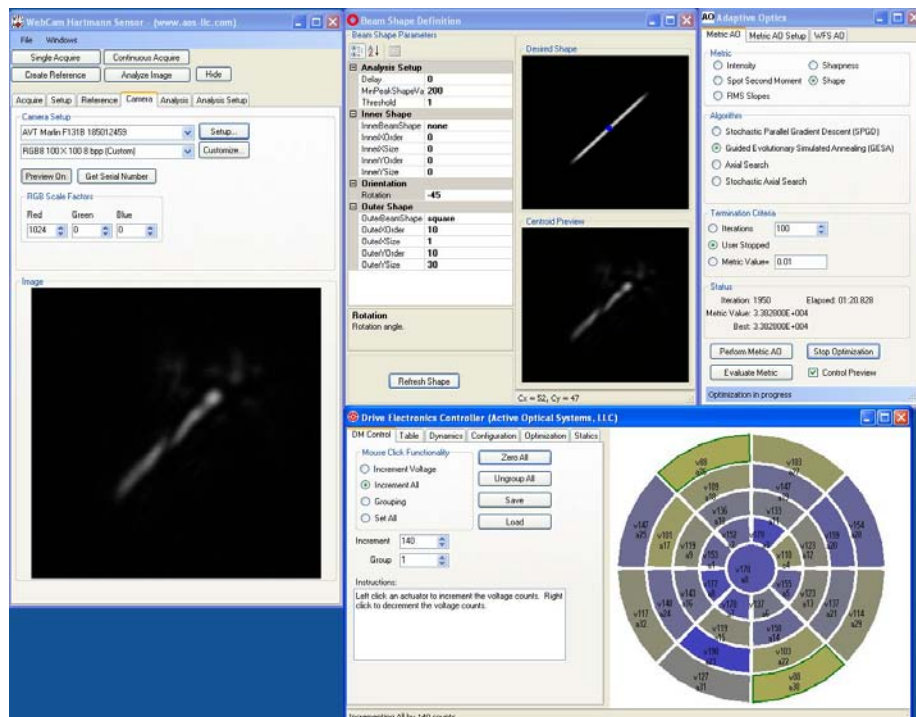


図18 ビーム整形制御ソフトウェアスクリーン

画面の取り込みを行い、その平均値をとっていたが、これを 2-3 画面に平均化することで表示画面が安定し、およそ 4-5 倍の取込速度の向上が実証出来た。

- ・ 画像取込間隔の設定値を短縮し、高速で安定した画像データが得られていることを確認した。これらの検出器の信号処理系の改善により、画像通信速度で 10 倍の高速化を実現した。この、高速化は1-3でのビーム整形実験結果から 5-10 倍の高速化の実現が実証された。

③ 自動ビーム整形ソフトウェアに関する改良

- ・ 自動ビーム整形ソフトウェアのビーム形状検出器の制御に自動ゲインコントロールを追加した。ビーム形状検出器でレーザービーム形状を検出する際に、入射するレーザーの光量を適正化するために、外部フィルターを設置し、適正な光量レベルにセット出来るようにした。
- ・ 形状可変ミラーのビーム形状検出器に入射するレーザー光に局所的な高輝度な部分が現れ、正確なビーム形状の画像を認識することができなくなる。この問題点の解決に対し、サチュレーションを避けるためにオートゲインコントロール機能で入射光のゲインを自動的に制御し手動による外部減衰フィルターの追加設置、変更や交換の必要をなくした。これにより、光軸調整後ビーム整形操作において一切、手動に

よる調整等を省くことができ、加工現場等で熟練者による調整の必要がなくなり、コンピュータの遠隔操作による完全自動制御が達成された。

最終章 全体総括

1: 複数年の研究開発成果

ロシアおよび米国で長年研究開発が行われてきたアダプティブオプティックス技術は、位相波面計測技術とソフトな面を有する形状可変ミラーの反射面形状の制御の融合により、レーザービームの長距離空間伝搬の散乱補正に有効な技術として発展してきた。

しかしながら、この技術は軍需技術や天文観測技術として精力的に研究されてきたが、民生用途には適用されてこなかった。この形状可変ミラーを用いたレーザービーム計測、波面補正技術は高度な微細レーザー加工に応用することで、加工ビームのエネルギー形状を制御でき、加工性能および加工スループットの向上が実現可能である。

上記の背景のもと、下記の6サブテーマを掲げて開発を行ってきた。

- ①-1 形状可変ミラーの構造設計
- ①-2 形状可変ミラーのコーティング性能の評価
- ①-3 レーザービーム整形性能の評価
- ②-1 ビーム形状検出機構の開発
- ②-2 形状可変ミラーの制御アルゴリズムの確立
- ②-3 制御アルゴリズムのソフトウェア化

その結果、本研究開発では切削、穴あけ等の微細加工用途に適したビームエネルギー形状の再配置によるビーム整形技術の研究開発を行い、レーザー加工機に適したビーム整形装置を開発試作した。これにより、軍需用や天文観測と異なり小型で高出力なレーザー加工機に適応するために小型で円形であるガウシアンビーム形状の整形に適した、形状可変ミラーの開発に注力し目標を達成した。また、瞬時にビーム整形を行うべく高速なビーム形状検出器を開発し、さらに形状可変ミラーの面形状を高速に制御可能な自動ビーム整形ソフトウェアの開発をした。特に最終年度であるH21 年度ではこれらの開発技術を統合し、ビーム整形技術を検証するために遠隔操作による自動ビーム整形加工実験装置を試作し、サンプル加工実験によりビーム整形技術の有効性を検証した。本年度実施したステンレス板の溝加工結果において、深さ方向の加工結果に加工レーザービームのエネルギー形状に対する相関性が実証された。今後、加工業者等の協力を得て各種加工実験とその最適化を図り、最先端微細加工である多層基板のビア穴あけ等の微細切断技術への適用を図る必要がある。いづれにしても、今回の結果は、民生用レーザー加工装置による初めての加工評価実験であり、今後の製品化と事業化の実現の第一歩となる。表3に本研究開発の各サブテーマに関する研究目標と研究成果をまとめて示す。

表3 研究開発の目標とその成果まとめ

研究課題	研究目標	研究成果
サブ テーマ 1-1	①UV 可変ミラー用薄膜基板の材質、膜厚の最適化 ②将来の高速動作に向けて1000Hz 以上の高周波応答特性を持つミラーの試作 ③装置の加工装置安定化に向けてミラーを筐体パッケージ化	①ビーム整形に最適な電極構造を試作、実証(H19) ②量産性、低コスト、高品質を考慮し、>1000Hz の高速応答性を実証(H20) ③防塵・ノイズ保護目的の可変ミラーパッケージを完成(H20) ④各種電極パターンの基板を試作し、シミュレーションにより電極基板形状の最適選択を決定(H19) ⑤ガウシアン形状が主流のレーザー加工機は円形、矩形のトップハット形状のビーム整形は8分割円形(ドーナツ)形状が最適と決定(H19)
サブ テーマ 1-2	①微細加工用途に向けて波長355nm 帯用のコーティング付きミラーの試作 ②微細加工用途に向けて平均出力>1W;波長355nm 用のコーティング膜の達成 ③信頼性向上のための1064nm のダメージ耐性の達成(平均出力>50W)	①赤外線レーザー(1064nm)用でコーティング破壊@7500MW/cm(100ns;20kHz)を実現(H21)。 ②紫外線レーザー(355nm)用で コーティング破壊@700MW/cm(10ns;25kHz)、を実現(H21)
サブ テーマ 1-3	①微細加工用途に向けて波長355nm レーザーで各種形状のビーム整形自動化の達成 ②切削加工実験用に移動可能なファイバーレーザと可変ミラーを組み込んだ装置の一体化 ③各種形状のビーム整形自動化装置を用いた薄膜切断評価の実施	①実用化を見据えた可搬型コンパクトビーム整形実験装置の試作(H20)、 ②外形B4サイズの可搬型自動レーザービーム整形装置の一体化を達成(H21) ③該装置でビーム形状3種(トップハット;リングビーム;ラインビーム)の整形実験を実施し、それぞれビーム整形に1分-2分程度で目標ビーム整形を実現(H21) ④更に、精密レーザー加工用途に波長1060nm ファイバーレーザーによる各種形状のビーム整形自動化を達成(H21)
サブ テーマ 2-1	①高速監視用CMOSカメラを高速制御用ビームプロファイラーとして最適化	高速監視用CMOS検出器で>300Hzで超高速ビーム形状検出を達成(H20)
サブテ ーマ 2-2	①検出系とビーム整形光学系の組み合わせとシミュレーションの実施	検出系とビーム整形光学系とを組合わせた制御アルゴリズムを確立(H20)

サブテーマ 2-3	① ビーム整形をPCで自動化するソフトウェアの製作 ②PCを用いて実際の自動ビーム整形の最適化 ③ビーム形状をPCで遠隔操作した自動制御の実証	①H19年度に調査検討した、制御アルゴリズムを形状可変ミラーの制御ソフトに組み込み遠隔操作によるビーム整形を実現(H20) ②自動ビーム整形制御ソフトウェアを開発、PCの遠隔操作による3種類(トップハット形状、リング形状、ライン形状)の自動ビーム整形に成功(H20) ③H加工現場への実用化を目指し、制御アルゴリズム適正化(H21)とソフトウェアのアップグレードにより高速化(H20年:30分⇒H21年:1-2分程度)とビーム整形の高精度化(H21年:ビーム整形によるエネルギーロス<10%)を実現した(H21)
--------------	---	--

2: 研究開発後の課題

本研究開発により、1 μm の赤外レーザー加工機と355nmの紫外微細加工レーザー装置に適応したビーム整形装置の実験機が完成し、同装置によるビーム整形評価を行った。しかしながら、形状可変ミラーを搭載したビーム整形装置を微細加工用途分野において付加価値のついた商品として提供するためには、電子部品等の加工現場での詳細なニーズや環境適応性を検証し、当該実験装置を加工現場で評価することが重要である。また、本研究開発で製作した実験装置は複雑な設定を可能とするソフトウェアであるが、実際の加工現場で採用されるためにはユーザーフレンドリーな操作性を持つ装置とすることが重要である。また加工現場での詳細なニーズに対応したユーザーが希望するソフトウェアインターフェースの開発も必要となる。これらの課題に対応すべく、今後は本開発成果をベースにデモ装置を試作し、加工現場でデモ装置として評価を受け、これら問題点に適切に対処することで良い製品を作り上げることを目指す。

3: 事業化展開

本研究開発成果を基に、形状可変ミラーを用いた複合レーザー加工機を新製品として事業化すべく製造、販売、メンテナンスを行う事業会社の設立を策定中である。以下事業化実現へのステップについて述べる。

① 評価用デモ装置の開発試作実施。

H21年度開発試作したビーム整形実験装置は、B4サイズ以下のコンパクトな設計となっている。しかし、既存のレーザー加工装置などに組み込む場合、加工工場などの現場に適応した小型で密閉型のパッケージングを施した評価用デモ装置を試作し、加工現場にてデモ、評価を受けなければならない。よって、来年度は図19に示すようなデモ用ビーム整形装置を1-2台試作する。))

② インターネッコン等展示会での新製品紹介とマーケティング。

本研究開発を行ったビーム整形装置は、切削、穴あけ加工のみならず、適応分野

は広い。従ってこのような非常にユニークな技術であるビーム整形装置を広く紹介し、マーケティングするためにインターネット等々の展示会を活用し、本技術を紹介すると共にユーザのニーズ開拓する。

③ 加工装置メーカーやジョブショップ等と共同による装置最適化。

ビーム整形装置を使用した加工ソフト技術の開発は、その専門企業である加工装置メーカーやジョブショップに評価用デモ装置を持ち込み、共同でデモ・評価を通じて製品の適応性を高め、市場開拓を図る。

後付け型ビーム整形制御装置製品概念

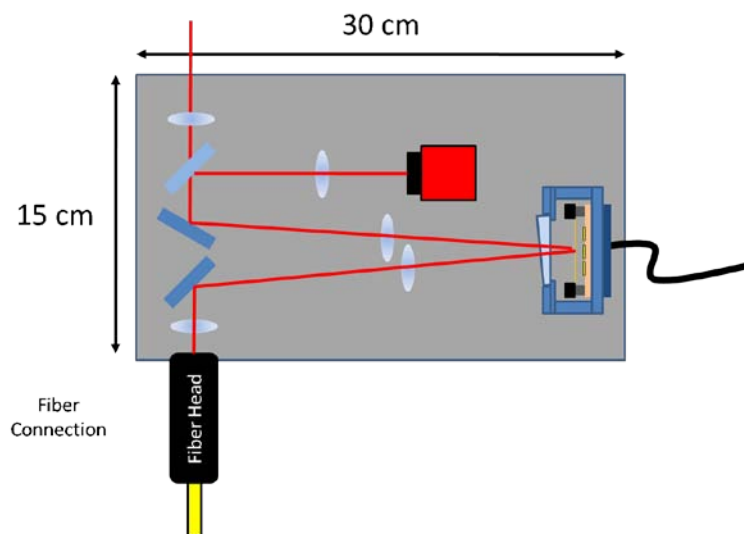


図19 評価用デモ装置の概念図

④ 数年以内に加工装置メーカーへの OEM 販売実施。

現在、3社が当該ビーム整形装置に興味を持っており、評価テストを希望している。これらはレーザー発振器メーカーおよびレーザー加工装置メーカーであり、デモ・評価を通じて OEM 装置開発ビジネスを構築してゆく。

⑤ 加工業者向けにビーム整形制御装置(¥2～3M/装置)販売。

上記④に対し、川下業者である加工業者向けビーム整形装置は、重要な市場である。現在、レーザー加工機による中小部品加工業者は国内数10社存在する。我々が開発したビーム整形装置は既存のレーザー加工機に後付けが可能であり、ビーム整形技術による加工は新たな加工技術をもたらし、これら企業の活性化を促進することが可能である。上記のジョブショップ等で加工技術開発を行い、後付け型ビーム整形装置を数百万円で提供することで、中小加工業者は最新の加工技術を有することができ、また、我々も潜在市場として数百台から数千台の販売を見込むことができる。

以上