

高輝度光ビーム加工技術に関する研究

多機能フォトンマシニングセンタの開発

(1)多機能フォトンマシニングセンタの開発

- ・研究者：ふくい産業支援センター 雇用研究員 富田誠一（株）松浦機械製作所 派遣）
ふくい産業支援センター 雇用研究員 田中隆三（株）松浦機械製作所 派遣）
ふくい産業支援センター 雇用研究員 市村誠（株）松浦機械製作所 派遣）
福井大学 共同研究員 岩井善郎
福井大学 共同研究員 竹下晋正

・研究の概要

従来には無い新しいコンセプトの多機能フォトンマシニングセンタの開発を目的とし、各種レーザによる加工技術の研究を実施し、その加工技術を応用した3機種が多機能フォトンマシニングセンタを開発した。

・成果展開可能なシーズ

(1) 金属光造形複合加工試作機

CW型レーザ Nd:YAG 300W/Yb:YAG 180W, ワークサイズ 250mm×250mm×150mm

(2) 短パルスレーザ・アブレーション加工試験装置

ピコ秒パルスレーザ Nd:YVO4 10W, ワークサイズ 300mm×300mm

(3) フェムト秒レーザ援用光ナノ加工・改質実験装置

フェムト秒パルスレーザ Yb:YAG 3W, ワークサイズ 150mm×150mm

1. はじめに

レーザ加工は自動車部品や車体の溶接・切断および電子部品のリソグラフィなど、様々な産業分野に応用を広げており、わが国の基幹産業を支えるキーテクノロジーとなってきた。しかし、レーザの加工用途はほとんど限られているのが現状である。CO₂レーザやYAGレーザにおいては、溶接・切断・穴あけ・マーキングという4つの用途が全体の8割以上を占めている。

近年では、パルス幅がフェムト秒オーダーで、ピークパワーがギガW以上となるフェムト秒レーザが加工に使用されはじめ、徐々にレーザ加工の応用が拡がりつつある。

本研究では、レーザの持つ特徴を活かした加工方法を研究開発することで、幅広い加工用途への応用展開が可能となり、産業の活性化が図れるものと考え、新しい加工技術を応用した多機能フォトンマシニングセンタの開発を行った。

2. フェーズの研究目的および内容

本研究では、ナノ秒固体レーザを搭載した多機能フォトンマシニングセンターの設計・試作の指針および応用展開を目的とし、付加価値の高い電子部品材料（フラットパネルの基板材料のITO薄膜、電子デバイス基板材料のアルミナセラミックス）の微細加工をターゲットとしたレーザ加工技術の開発を行った。また、多機能フォトンマシニングセンターの開発における要素技術として、レーザビームの制御技術について研究した。

当初の目標以外にも光造形と高速切削の融合した新しいレーザ造形技術である金属光造形複合加工試験機の開発を実施した。

3. フェーズ の研究成果

3.1 ITO 薄膜の選択的除去加工における波長依存性

フラットパネルなどの基礎材料として利用されている ITO 薄膜のパターン形成は、従来ウェットケミカルエッチング法により行われているが、工程数が多く、多量の溶剤の廃液処理など問題が多い。そのため本研究では、ITO 基板のパターン形成におけるレーザービームの直接描画方式の実用化を目指し加工技術の研究を行った。

表 1 に示すようなパルス幅がナノ (10^{-9}) 秒オーダーの異なる波長のパルスレーザーを用いて ITO 薄膜のライン加工を行い、その加工領域

のエッジ部分の比較を原子間力顕微鏡：AFM によって観測した (図 1)。

各波長によって、溶融物の再凝固領域の違いが見られた。

基本波による加工では、溶融領域が広く、ITO 薄膜とガラス基板の表層に亀裂が生じた。第 2 高調波による加工では、吸収率が低いために加工効率は低いが、その分、熱による溶融領域は狭くなり、亀裂も減少していた。UV 域波長を比較すると、第 3 高調波による加工では、加工効率は高いが、ITO のバンドギャップエネルギーよりも光子エネルギーが低いために、熱による溶融領域が広い。しかし、基本波と比較すると熱影響が少なく ITO 薄膜の亀裂も少ない。第 4 高調波による加工では、光子エネルギーが高いため良好なアブレーションが得られ、溶融領域が狭く、亀裂もほとんどないみられないことが分かる。

但し、ITO 薄膜の溶融領域の亀裂については、ITO 薄膜の膜厚が薄いものでの可能においては減少する傾向が見られた。また、ガラス面の亀裂においては、基本波での加工にのみ発生した。基本波以外では、ガラス面に若干の溶融跡があったが、大きな亀裂はみられなかった。

以上の結果より、吸収率の高い UV 域の波長を使用することで、品質の高い加工ができることが分かった。しかしながら、UV 域の波長を使用しても、加工溝エッジ部分の熱溶融による盛りりを完全に解消することができなかった。さらに高品質な加工が要求される場

表 1 使用レーザーの特性表

レーザー媒質	Nd:YLF 結晶			
中心波長	基本波	第 2 高調波	第 3 高調波	第 4 高調波
	1047	524 nm	349 nm	262 nm
平均出力	30 W	15 W	5 W	3 W
パルス幅	60 nS	50 nS	47 nS	40 nS
繰返周波数	10 kHz			

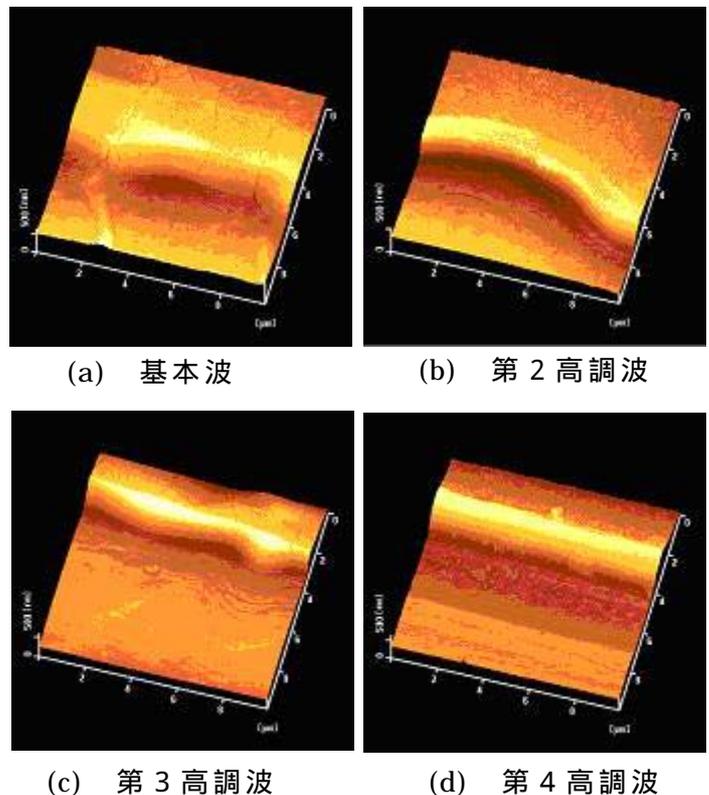


図 1 エッジ部分の AFM による観測結果

合には，パルス幅がナノ秒オーダーより短いパルスレーザーによる断熱的な加工が必要となる．

3. 2 フェムト秒レーザーによるITO薄膜の除去加工特性

ナノ秒レーザーでのITO薄膜の除去加工以上に高品質な加工を実現するため，パルス幅が 30×10^{-15} 秒～と非常に短いフェムト秒レーザーによるITO薄膜の除去加工実験を行った．フェムト秒レーザーの使用によって，ターゲットへの1パルス当たりのエネルギー照射時間が短くなり，熱影響の低減した断熱加工が可能と予想される．また，パルス幅を短くすることによって，低エネルギーでもピク値では高い光強度が得られ，多光子吸収によって透明材料に対しても高い光吸収が生じると考えられる．本実験に使用したフェムト秒レーザーの特性を表2に示す．

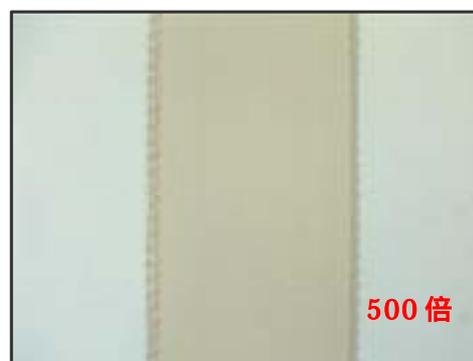
表2 使用レーザーの特性表

中心波長 (nm)	800
パルスエネルギー (mJ/pulse)	0.7
パルス幅 (fs)	30
繰返し周波数 (kHz)	1
ビーム品質 (M^2)	< 2

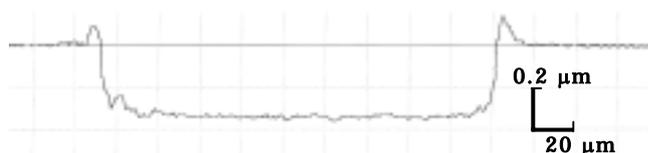
ナノ秒レーザーとフェムト秒レーザーとの加工特性の比較を行った．ITO薄膜(膜厚:330nm)は，ガラス基板上にスパッタリングによって成膜されたものを使用した．フェムト秒レーザーの照射は，出力一定(700mW)で，ナノ秒レーザーの加工と同様にZ軸の移動による集光ビームをデフォーカスによって照射光強度密度を調整した．大気中ではビームの集光点において，高強度光によるエアブレイクダウンが生じるため，照射領域は集光点よりも前の部分とした．また，加工条件は基板ガラスへの損傷がなく，かつITO薄膜の取残しが無いように設定した．ナノ秒レーザー(基本波)とフェムト秒レーザーとの加工結果を図2に示す．



(a 1) ナノ秒レーザーによる加工結果の観察図

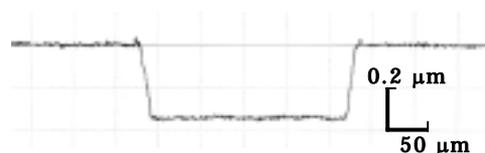


(b 1) フェムト秒レーザーによる加工結果の観察図



(a 2) ナノ秒レーザーによる加工溝の断面図

- ・加工幅 : 190 μm
- ・送り速度 : 200 mm/s



(b 2) フェムト秒レーザーによる加工溝の断面図

- ・加工幅 : 230 μm
- ・送り速度 : 20 mm/s

図2 ナノ秒レーザーとフェムト秒レーザーとの加工特性の比較

ナノ秒レーザーによる加工では，加工溝のエッジ部分に熱熔融による盛り上がりが生じた(図

2(a-2))。しかしフェムト秒レーザーによる加工では、ナノ秒レーザーと比較するとその盛り上がりほとんど見られず(図 2(b-2))、熱影響による溶融層の発生が抑えた加工結果が得られた。また、パルスのピーク出力が非常に高いにもかかわらずガラス基板への影響も少ない。ナノ秒レーザーの基本波、第 2 高調波では、ガラス基板上に ITO 薄膜の残渣が生じ易かった(図 2(a-1))。フェムト秒レーザーの波長は近赤外域であるが、このような残渣も生じていない(図 2(b-1))。さらに、ナノ秒レーザーの加工において、加工による飛散物が発生し、飛散物の再堆積物(デブリ)を防ぐためには、He ガスのような分子量の小さいガスを吹きつける必要があったが、フェムト秒レーザーによる加工では、大気中での加工にもかかわらず、加工溝の周辺にデブリがほとんど見られない(図 2(b-1))。これは、高強度光のレーザー照射によって飛散物の上昇位置が高く、そのまま大気中に放出されるからだと考えられる。

ナノ秒レーザー(基本波)とフェムト秒レーザーによる加工溝のエッジ部分を SEM によって、さらに詳細な観測を行った。図 3 にその比較を示す。

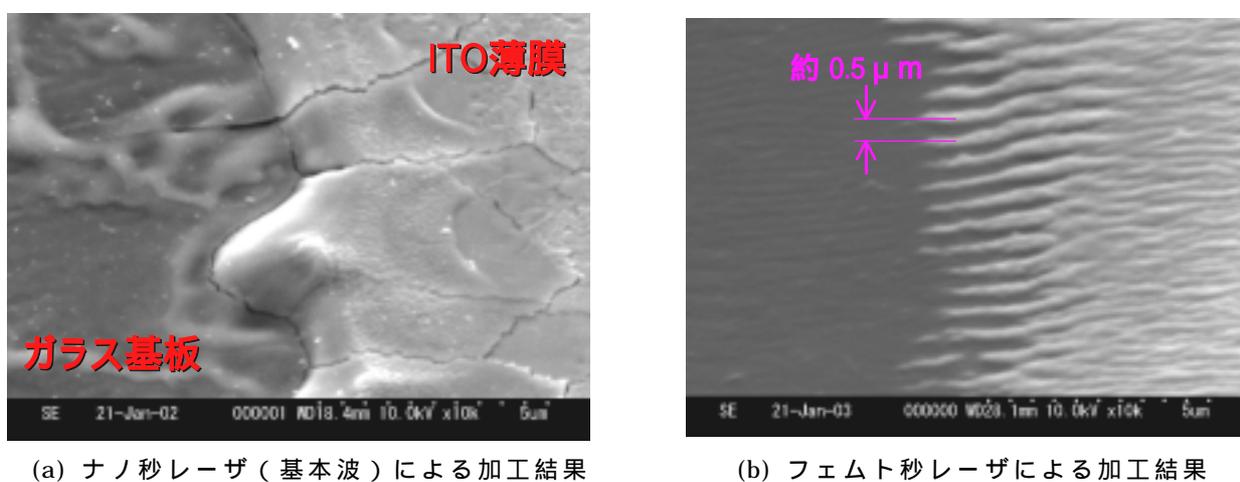


図 3 SEM 観測による加工溝エッジ部分の組成の比較

ナノ秒レーザーと比較してフェムト秒レーザーの加工(図 3(b))では、熱による溶融やマイクロクラックは見とめられない。しかしながら、エッジ部分の ITO 薄膜に周期的な微細構造が生じた。この周期構造の間隔は照射レーザーの波長以下の長さである。

この周期的な微細構造は、さらに詳細な観測によって、レーザービームの偏光方向(電界方向)と相関があることが分かった。薄膜の微細パターン形成を行う場合、図 3(b)で見られる微細構造を解消する必要がある。よって、ステージの走査方向と偏光方向を変えた加工を行うことで、レーザービームの偏光方向に対する加工形状特性について実験を行った。実験は光路に波長板を挿入し、水平偏光であったレーザービームを垂直偏光または円偏光に変換することで偏光方向の切替えを行った。図 4 に膜厚 330nm の ITO 薄膜に対し、ビームの偏光方向を変えた加工結果を示す。

いずれの偏光方向においても、ナノ秒レーザーで発生したような溶融やマイクロクラックがない良好な加工結果が得られた。直線偏光による加工では、エッジ部分の ITO 薄膜に対して、偏光方向と垂直である周期的な微細周期構造が生じた。円偏光による加工では、傾きが変わった周期構造が若干残ってはいるものの、直線状の周期構造を低減しエッジ部分の平滑性が向上していることが分かった。また、直線偏光と比較して、円偏光による加工

のほうがITO薄膜除去後のガラス面の荒れも低減した。

3.3 形状可変型ミラーによるビーム整形技術の基礎特性

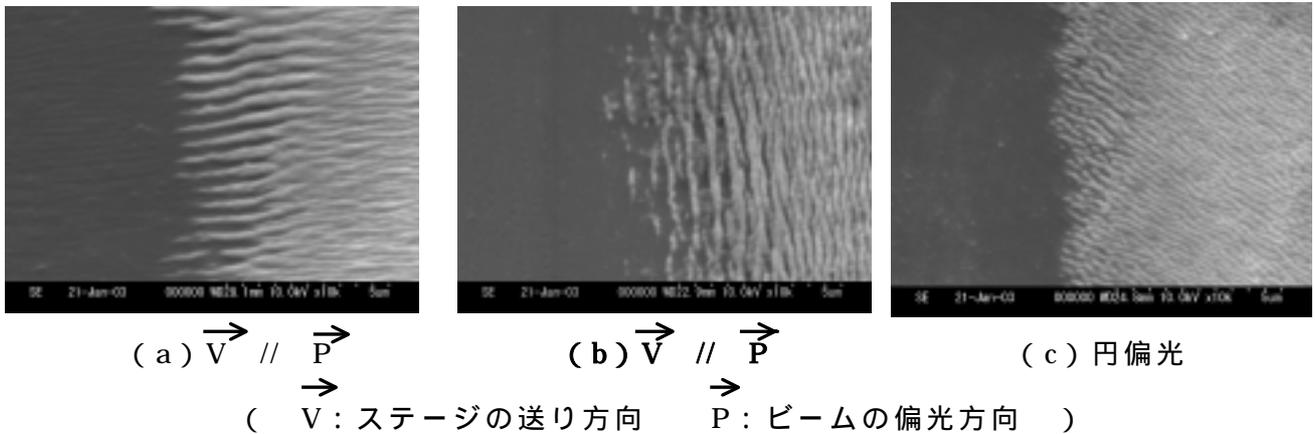


図4 偏光方向の違いによる加工特性の比較

レーザ微細加工を行う上で、ビームの光強度分布やパターン形状は重要な技術課題となっている。直接描画によるITO薄膜の加工においては、集光ビームの光強度分布がガウシアン分布であると、基板にダメージを与え易いため、トップフラット分布へ変換する必要がある。本研究では、形状可変型ミラーを利用したビーム整形技術の検討実験を行った。

形状可変型ミラー(Deformable Mirror 以下DM)とは、薄いミラーの背面にある複数の電極に電圧を印加することで、電極とミラー基板間に発生する静電力によってミラー面の形状を変化させる光学デバイスである。ミラー形状を可変することで、入射したレーザビームの波面を制御または補正をする。本研究では、Intellite社製の形状可変型ミラーを使用した。ミラー部は、図5に示すような電極配置になっている。

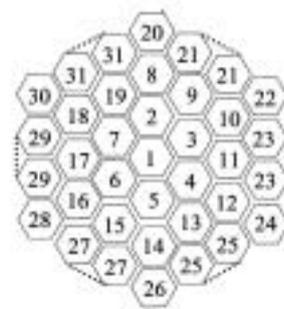
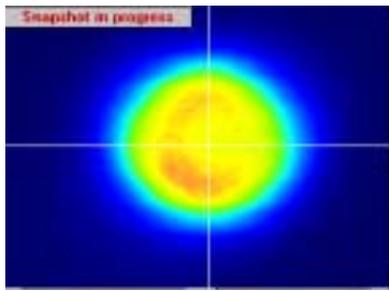


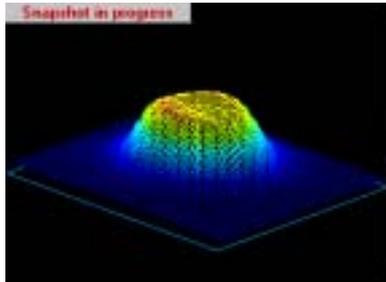
図5 電極の配置図

ビームの光強度分布の均一化として、形状可変型ミラーによるビームの波面制御を行い、ガウシアン分布からトップフラット分布への変換を行った。図6にトップフラット化を行った例を示す。現状では、125μmにおいて強度分布の均質度が±10%内であることが実測にて確認できた。

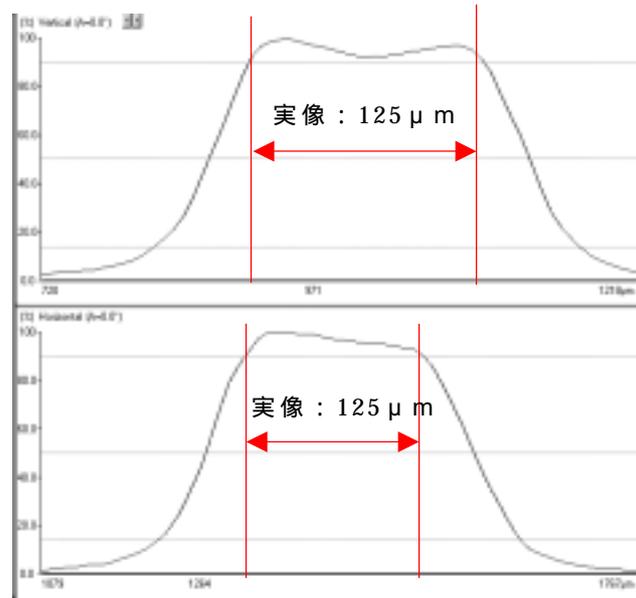
従来、形状可変型ミラーは波面の歪み補正等に使用されてきたが、ダイレクトにビーム形状を制御することが可能であり、薄膜の除去加工や微細形状加工においても有効な手段と成り得ることが確認された。また、印加電圧を制御することによって、アクティブにビーム形状を操作できるという特長があり、レーザ加工機における高機能化が期待できる。



(a) 2D プロファイル



(b) 3D プロファイル



(c) 3D プロファイルの断面（1.5倍の拡大像）

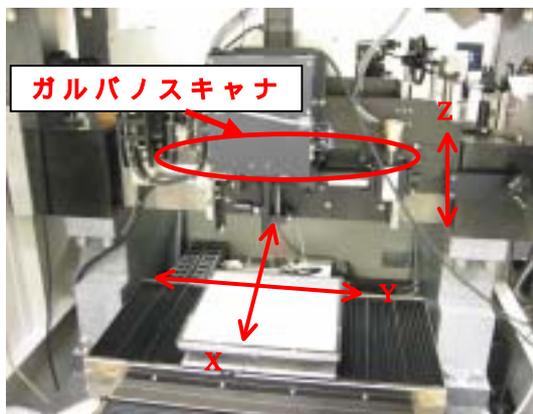
図6 DMによる整形ビームの比較（焦点距離 800mm ， 焦点位置）

3.4 短パルスレーザ・アブレーション加工試験装置の開発

本事業で得られたITO薄膜の選択的除去加工技術をシーズとして、経済産業省の地域新生コンソーシアム研究開発事業に橋渡し、UVピコ秒レーザによる精密フラットパネル材



(a) ドライエッチング加工装置の全体図



(b) 加工ステージ部の概観図

図7 ドライエッチング加工装置の概観図

表3 エッチング加工装置の仕様

レーザ波長	355 nm	
レーザ出力	2W (@ 100 kHz)	
ビームモード	ガウシアン/トップフラット	
ビーム走査方式	ステージ/ガルバノミラー	
ステージ	ストローク	X/Y/Z 275/275/100 mm
	最大速度	X/Y/Z 1000/1000/300 mm/s
	繰返し位置決め	X/Y/Z ±2/±2/±5 μm
	分解能	1 μm
集光サイズ	20 μm (Min.)	
加工精度	±10 μm	
テーブル寸法	314X314 (有効 294X294) mm	
欠陥検査機能	視野	4×4 mm
	分解能	4 μm
	検査速度	100 mm/s
	検査項目	<ul style="list-style-type: none"> ITO薄膜の残渣検出 基板の損傷検出 リップル幅エラー検出

料ドライエッチング加工装置（短パルスレーザー・アブレーション加工試験装置）の開発を行った．ここで本加工装置について紹介する．開発した加工装置の概観図，および仕様を図 7，表 3 にそれぞれ示す．

開発した加工装置は，レーザービーム固定でステージ走査とガルバノスキャナミラーによるビーム走査の 2 パターンの加工方法が可能である．また，画像処理によるリアルタイム欠陥検査機能を備えており，加工および欠陥修正が 1 台の装置で行えるものである．

本加工装置により加工エッジ部分の平滑化を行うために、レーザービームの偏光方向の制御を行い、短パルスレーザー特有の微細周期構造の低減する加工実験を実施した（図 8）．

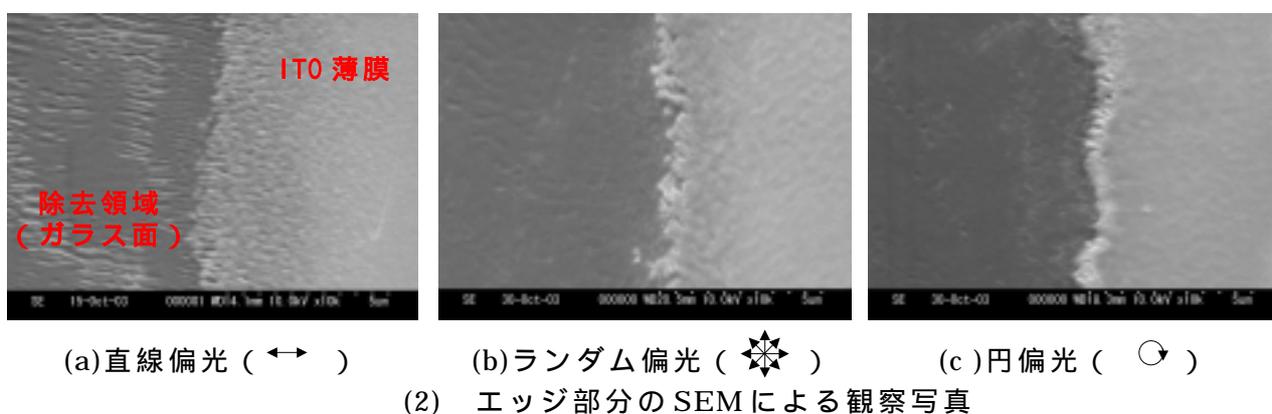
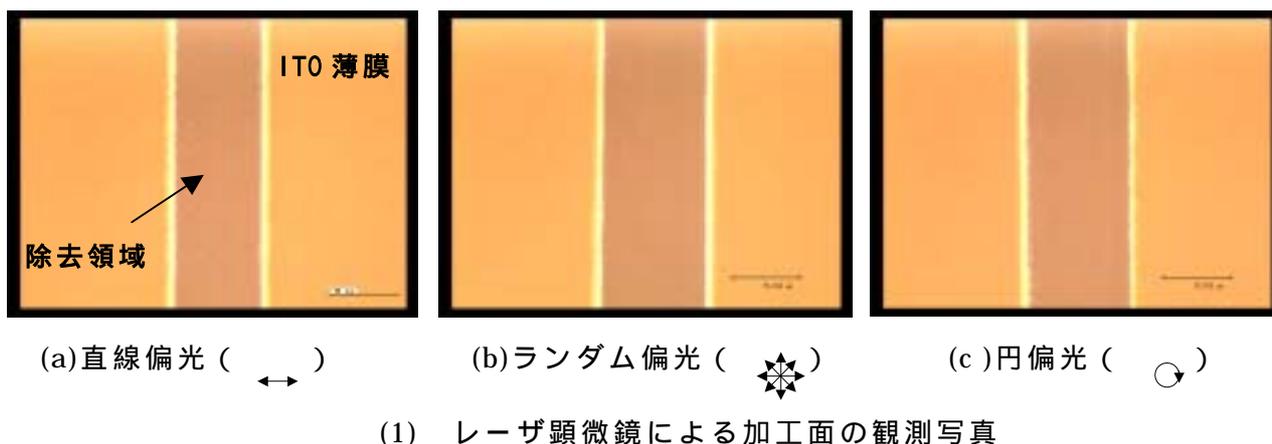


図 8 偏光方向による加工形状の比較

レーザービームの偏光方向による加工形状の比較実験を行った結果，円偏光による加工のとき，エッジ部分の微細周期構造の形成を抑制し，レーザーエッチング後のガラス面への影響も低減した．ピコ秒レーザーによる加工を行うことで，熱影響による溶融やクラックの発生を低減し，フェムト秒レーザーで顕著に見られる表層の微細構造の形成を抑制することが可能であった．

また，本装置では形状可変型ミラーによりビームの強度分布のトップフラット化を実施している．トップフラット分布では，強度分布がほぼ均一になっており，ピーク強度の 90% の値に対し ±10 % 以下の均一性が実現できた．

トップフラット矩形形状に整形されたビームによって PET シート上の ITO 薄膜の除去加工を行った．加工結果を図 9 に示す．

ビームの強度分布をトップフラット化し，さらにパターンを矩形に整形することによって，マスクレスで加工リップ幅を低減し，加工エネルギーの効率向上が可能となった．

今回開発した装置は，ワークサイズの制約等から，現段階ではケミカルエッチングによる製品と比較してやや劣るが，レーザドライエッチングに適した電極パターン等を提案していくことで，品質・生産性の向上が期待できる．

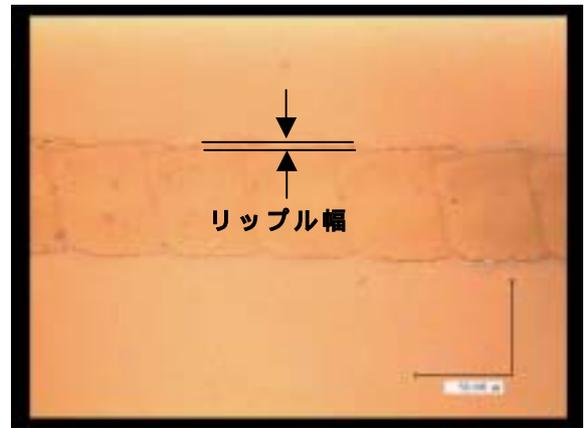


図 9 トップフラット矩形形状ビームによる加工パターン

3.5 金属光造形複合加工機の開発

本事業では、松下電工株式会社が開発を推進してきた金属光造形複合加工の基本技術(図11)およびプロトタイプ装置を基に、松下電工株式会社と大阪大学と共同で固体レーザを用いた金属光造形複合加工試験機の開発を行った。開発した金属光造形複合加工試験機の外観の写真を図10に示す。また金属光造形複合加工試験機の仕様を表4に示す。



図 10 金属光造複合加工試験機

表 4 金属光造形複合加工試験機の仕様

項目	仕様
加工サイズ	X/Y/Z 250/250/150mm
加工ヘッド移動量	X/Y/Z 340/300/100mm
主軸最高回転数	50,000min ⁻¹
主軸コレット穴	6mm
レーザ形式	YAGレーザ
レーザ平均出力	350W(連続)
レーザ焼結加減速度	平均2G(X/Y軸)
切削送り速度	X/Y軸:60m/min,Z軸:30m/min
ATC工具本数	8本

金属光造形複合加工法の概要を図11に示す。

- 造形するベースプレート上に一定の厚さの金属粉末を敷き詰める。
- レーザを走査しベースプレート上の金属粉末を必要な形状に焼結する。
- 上記で焼結した層の上に，と同様にスキージ装置で一定厚の金属粉末層を作る。
- 上記と同様にレーザ走査し造形する部分のみを焼結する。
- 上記，を10回程度繰返す。
- 造形を行った焼結10層分の側面を高速切削により仕上げる。
- 上記，，，を繰返し焼結・切削により造形を行う。
- 造形した最上面を高速切削により仕上げる。

金属光造形複合加工法により面精度±10μm，寸法精度50μm以下を実現できる。

図12に金属光造形法で作成したサンプルと金属光造形複合加工法で作成したサンプルを示す。表面の光沢からもわかるとおり金属光造形複合加工法での造形サンプルの方が高精度となっている。

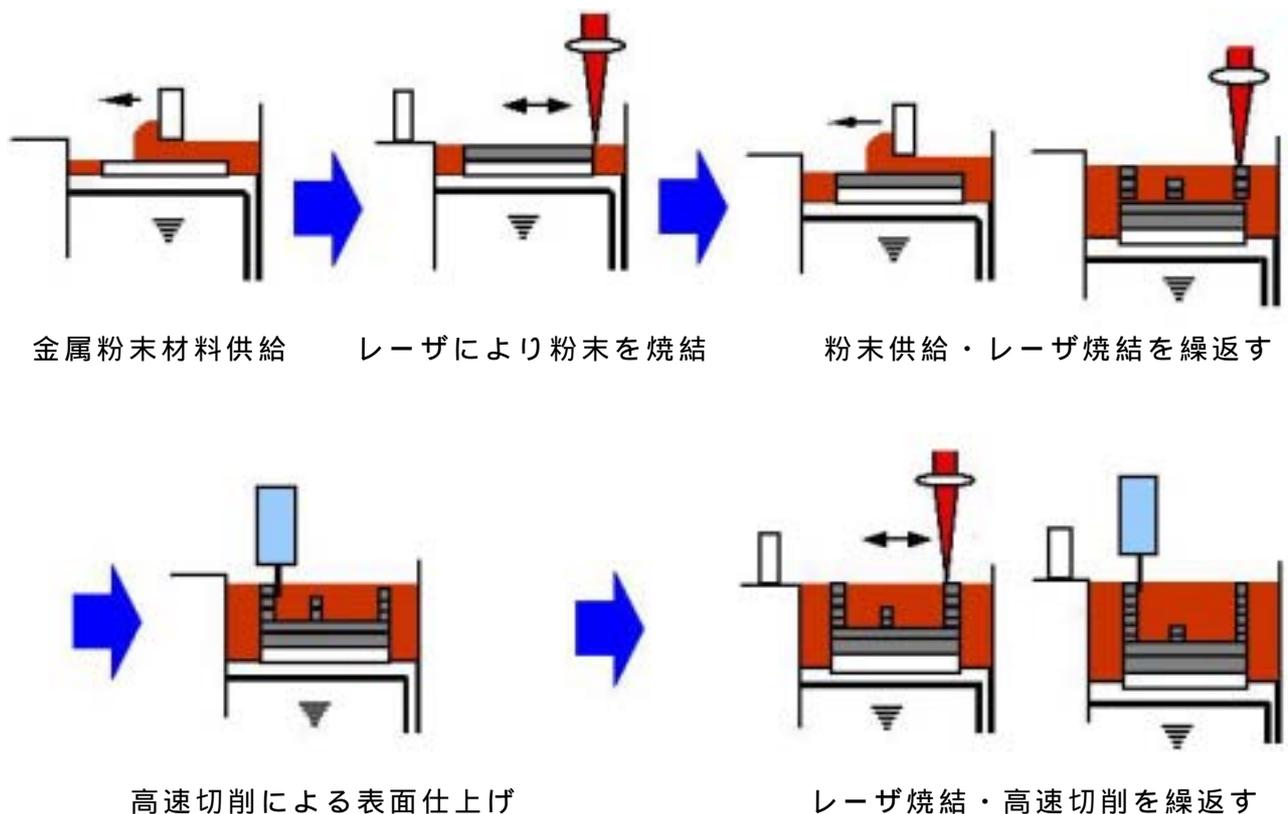


図 11 金属光造形複合加工法の概要

金属光造形複合加工機は光造形に高速切削を融合するという新しい加工法であり、複雑な形状のものを高精度に製作するが可能である。また金属光造形複合加工試験機を開発し金型製作に有効であることを確認した。

本事業により試作開発した金属光造形複合加工機はさらに機能の向上を図り、既に商品化・実用化されてきている。特にプラスチック金型の製作などへ利用され製作コストの低減や短納期の実現などにおいて大きな効果を上げ社会へ貢献してきている（図 13）。



図 12 金属光造形と金属光造形複合加工比較



図 13 商品化された金属光造形複合加工機

今後は金型以外における金属光造形複合加工法の応用展開を図る。

金属光造形複合加工試験機を使用して作成した造形物の機械的特性（造形密度評価，引張試験，硬さ試験）の評価を実施した．評価には，鉄系の金属粉末材料である松下電工(株)社製『ANUE9POW-GP1』（図 14： 粒径分布 20～45 μm ）を用いて造形を行った．

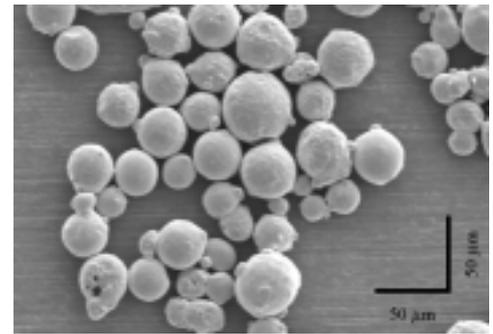


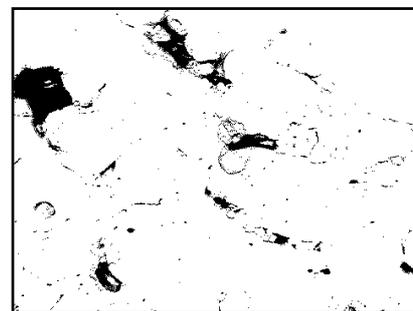
図 14 使用した金属粉末

(1) 造形密度評価

造形密度評価は金属光造形複合加工試験機で造形物を製作し，ワイヤー放電加工機で切断，造形物の中央付近の画像を CCD カメラで取り込み二値化処理を施し，空孔の割合を測定した．照射エネルギー密度に対する造形密度特性の結果を図 16 に示す．



(a) 内部組織観察写真



(b) 二値化処理した画像

図 15 造形内部の密度評価

図 16 からわかるように照射エネルギー密度が高くなると，造形密度も高くなるという結果を得た．また照射エネルギー密度が $80\text{J}/\text{mm}^3$ 以上になると，造形密度は，ほぼ 100% となることがわかった．尚，図中の Z_p は造形する 1 層の厚さである．

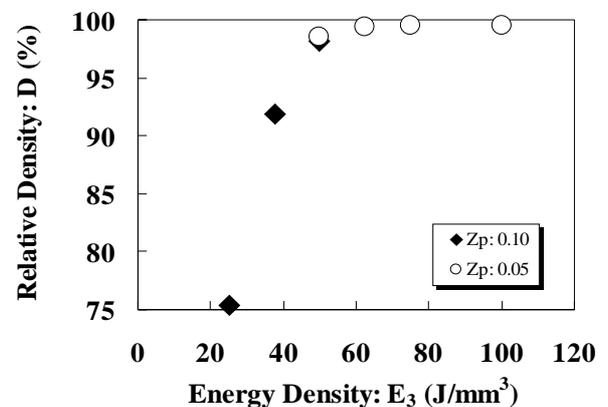


図 16 照射エネルギーに対する造形密度

(2) 引張試験

金属光造形複合加工試験機で製作した造形物の引張強さを調べるために，試験機で図 17 のような引張試験片（JIS 7 号試験片）を製作し引張試験を実施した．

照射エネルギー密度に対する造形物の引張強度特性の結果を図 18 に示す．

引張強度は造形密度と異なり，照射エネルギー密度が $40\text{J}/\text{mm}^3$ 付近が，強度が一番高く，照射エネルギー密度を $40\text{J}/\text{mm}^3$ 以上にすると引張強度は低下するという結果となった．



図 17 製作した JIS 7 号試験片

(3) 硬さ試験

金属光造形複合加工試験機で製作した造形物の硬さ試験は、図 19 の造形密度サンプルと同様な立方体の造形物をワイヤー放電加工機により切断し、切断面を研磨した後、硬さ試験機にて測定を実施した。

硬さ試験においても引張試験と同様に照射エネルギー密度を増加させても、硬度が強くない結果となった(図 20)。

また、照射エネルギー密度が $40\text{J}/\text{mm}^3$ 付近が造形物の硬度のピークとなった。

造形密度は照射エネルギー密度増加に伴い上昇するが、引張強度および硬さにおいては、強度のピークが存在する。これは照射エネルギー密度が $40\text{J}/\text{mm}^3$ 以上になると、造形物が熱による影響により組織変化が生じ強度を低下させるものと推測する。

また、この原因については使用する粉末材料成分の影響も考えられる。この点については、商品化への移行において明らかにし、より機械的強度の高い造形物の製作が可能ないように改善を図っていく。

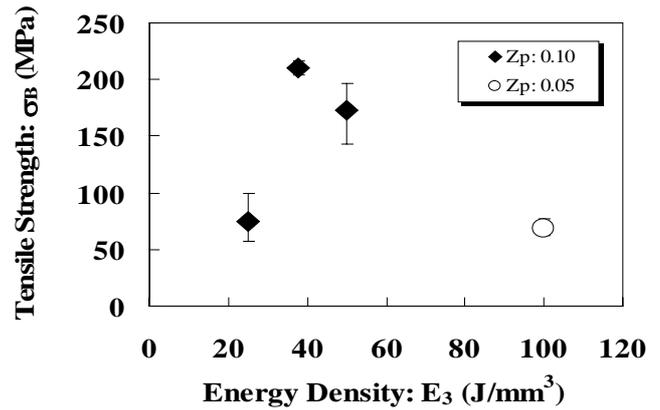


図 18 照射エネルギー密度に対する引張強度

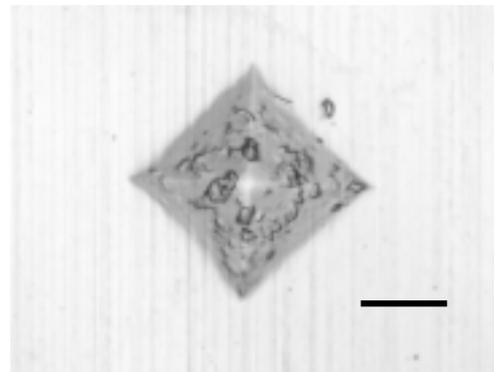


図 19 硬さ試験の圧痕

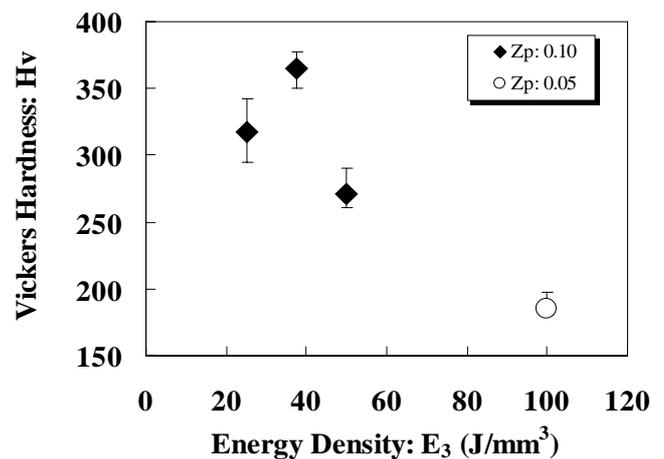


図 20 照射エネルギー密度に対する造形物硬さ

3.6 アルミナセラミックスのスクライピング加工特性及ぼす波長の影響

近年，集積回路の半導体基板の厚さが薄くなってきており，非接触加工であるレーザ加工により，熱影響のない薄板半導体基板の切断加工技術の開発が望まれている．本研究では，ナノ秒パルスレーザを用いたセラミックスのスクライピング加工における波長の影響を調べた．

試験装置はナノ秒パルスレーザ，XYリニアステージ，CCDカメラ，制御用PCから構成されている．試験片を固定し，制御用PCにより，レーザのON/OFF，加工対象物との距離（Z軸方向），加工位置（X,Y軸方向）の制御を行い，種々の加工条件のもとで試験を行った．

図21に加工断面の走査型電子顕微鏡（SEM）観察結果の一例を示す．本研究では，加工幅，加工深さ，デブリ高さを加工特性の評価項目としたが，触針式粗さ計，レーザ顕微鏡，SEMを用いて測定すると，測定法によって値に違いがみられた．加工深さを最も重要な加工パラメータとして，各測定方法を比較すると，深さが小さく幅の大きな溝形状の場合では，触針式粗さ計，レーザ顕微鏡ともにSEMによる計測結果とほぼ同じ値を示したが，逆に幅が小さく深さが大きな尖った溝形状になると，触針式粗さ計の測定値は，レーザ顕微鏡による測定結果よりも小さく，SEM写真による測定結果とも違いがみられた．デブリ高さは，測定方法による違いがみられなかった．そこで，SEMによる断面観察が最も確実な測定法ではあるが，試験片の切断が必要であることから，触針式粗さ計よりも実際の加工形状に近い測定が可能なレーザ顕微鏡を用いて測定を行った．

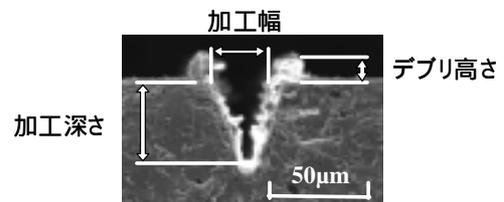


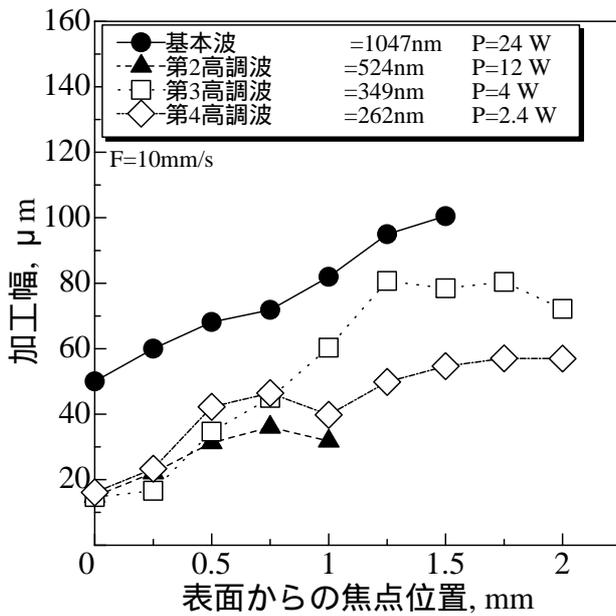
図21 加工特性の評価項目

図22に基本波，第2高調波，第3高調波，第4高調波における，焦点位置による加工幅，加工深さ，デブリ高さの変化を示す．デフォーカスによって，ビーム径が大きくなるほど加工幅は大きくなることわかる．しかし，アルミナセラミックスは基本波，第2高調波では光の吸収が悪いため，デフォーカスしていくと途中で加工が行えなくなった．デブリ高さはデフォーカスするほど小さくなる．これは，デフォーカスし加工幅が大きくなると，加工噴出物が加工溝の端部に付着しにくくなるためと考えられる．加工深さは，デフォーカスし，付与するエネルギーが低くなるほど小さくなる．

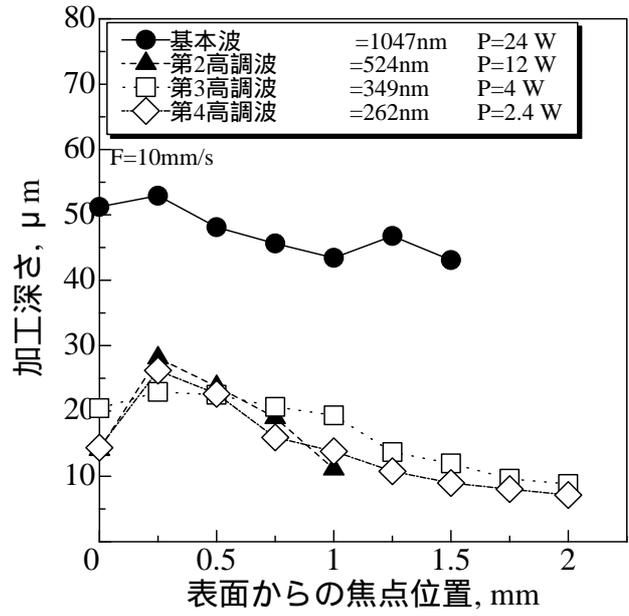
波長が異なっても焦点位置に対する加工幅と加工深さ及びデブリ高さの変化には類似性がある．また，第4高調波は小さな出力でも，他の波長とほぼ同様な加工深さが得られたことから，最も加工に適していることがわかった．

電子部品の基板材料であるアルミナセラミックスのスクライピング加工の研究として，Nd:YLFレーザの基本波，第2，3，4高調波を使用した加工特性における波長の影響について実験した．加工深さ特性では，各波長において，ジャストフォーカス位置よりもビームの集光点を試料内部に0.25mmに位置させることで，最も深い加工溝が得られた．波長の違いによる加工特性としては，波長変換効率を考慮すると，基本波による加工が最も除去効率が高い．しかし，熱影響が大きく，熱溶解に起因するデブリ高さも高い．第2高調波と第4高調波による加工深さ特性を比較すると，第4高調波による加工では，レーザ出力が1/5程度で同程度の溝深さが得られた．第4高調波による加工では，デブリ高さ

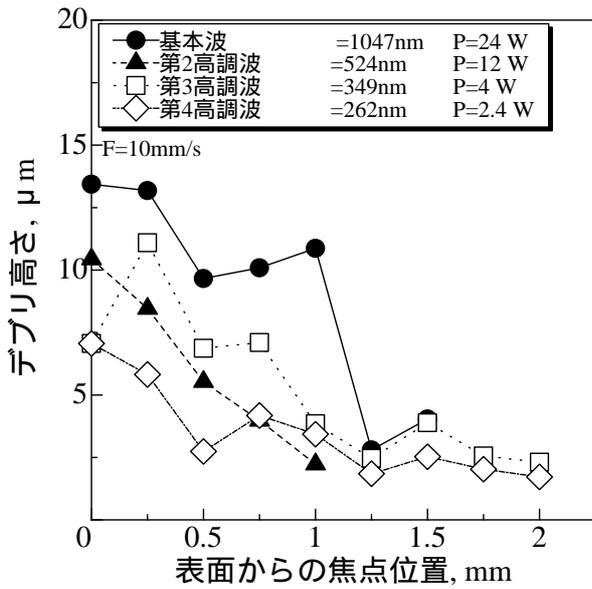
も低く，熱影響を低減して除去効率の高い加工が可能であることがわかった。



(a) 加工幅特性



(b) 加工深さ特性



(c) デブリ高さ特性

図 22 焦点位置と加工特性の関係における波長の影響
(レーザのパルス繰返し周波数：10 kHz，送り速度：10 mm/s)

4. フェーズ の研究目的および内容

フェーズ で開発した金属光造形複合加工試験機の機能向上と応用展開を目的とし、CW型 Yb:YAG レーザの搭載と、金属光造形複合加工法のバイオマテリアルへの応用研究を行った。また、超短パルスレーザの加工応用を目的とし、Cグループで研究を進めている超短パルスレーザ照射による周期微細構造生成をターゲットとし、Aグループで開発しているフェムト秒レーザを搭載したフェムト秒レーザ援用光ナノ加工・改質実験装置の開発を行った。

5. フェーズ の研究成果

5.1 金属光造形複合加工の応用展開

本研究では生体適合材のチタンを用いた場合の造形の機械的特性を明らかにし、また複雑な形状のバイオマテリアルへの金属光造形複合加工法の応用の可能性に調べる。さらにAグループで開発したCW型 Yb:YAG レーザを金属光造形複合加工試験機に搭載し、造形におけるその実用性を調べた。

チタン粉末（純チタン）をレーザにより造形を行い、その造形物に対し気孔率、硬さ及び引張強度を調べたので、以下に記述する。

気孔率

試験片は金属光造形複合加工機によりブロック状のチタン造形物を作製した。また気孔率の測定は試験片断面の中心部分をレーザ顕微鏡で撮影し、その画像を2値化し測定画像全体に対する気孔部の面積比率を求め気孔率とした。

図 23 にレーザ出力に対する気孔率の変化を示す。図からも明らかなようにレーザ出力を高くした方が造形物内の気孔が少なくなり良質な造形物が得られることが判る。

硬さ

硬さ測定は JIS Z 2244（ビッカース硬さ試験方法）に準拠して実施した。

図 24 にレーザ出力に対する硬さの変化を示す。尚、図中に標準的な純チタン（JIS 純チタン2種）の硬さを併せて表示した。

標準の純チタンと比較すると光造形により作

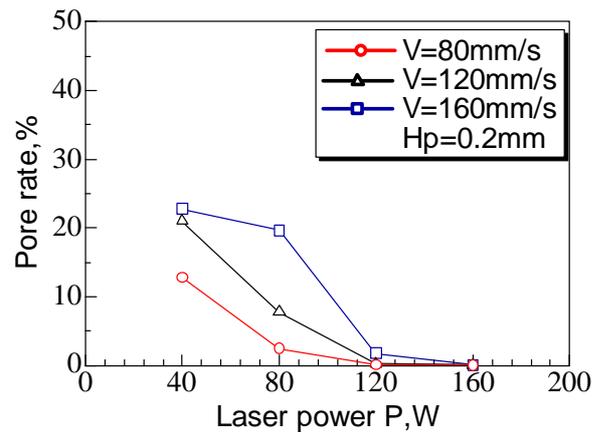


図 23 レーザ出力に対する気孔率の変化

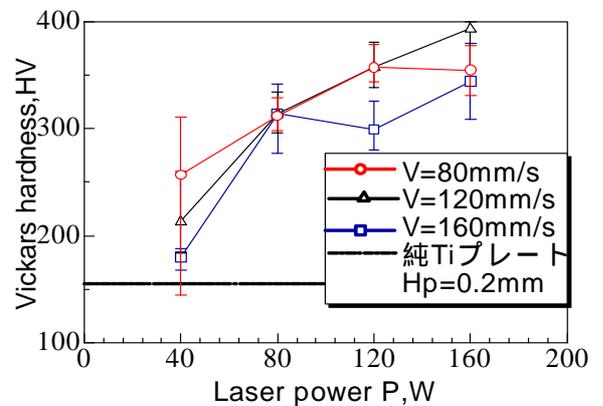


図 24 レーザ出力に対する硬さの変化

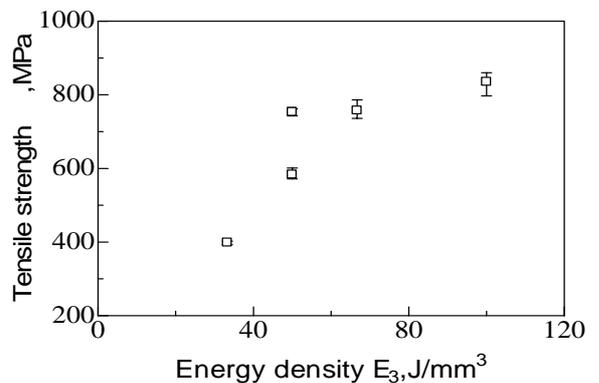


図 25 エネルギー密度に対する引張強さ

製されたチタン造形物は非常に硬いものであることがわかる。またレーザー出力を高くするとより硬い造形物の作製が可能となることがわかった。

引張強さ

引張試験は JIS Z 2201 (金属材料引張試験方法) に準拠して、引張速度を 1mm/min として実施した。図 25 に照射エネルギー密度に対する引張強さの変化を示す。

引張強さにおいても硬さと同様に、照射エネルギー(レーザー出力)を高くすると強さが増すという結果を得た。また、標準的な純チタン(JIS 純チタン 2 種)の引張強さは約 300MPa であることから光造形により作製したチタン造形物は非常に強いものであることがわかる。

今回の各試験にてレーザー出力(照射エネルギー密度)を高くするとより硬く、強い造形物の作製が可能であることがわかった。また光造形法によるチタン造形物は純チタン以上に硬く、強いという結果を得た。これは、チタン焼結造形において酸素などの侵入型元素が固溶するためではないかと考えられる。

次に生体適合性に優れたチタンを用いて人工歯根のサンプルを金属光造形複合加工試験機により製作した(図 26)。

製作した人工歯根は側面に設けた複数の穴が歯根内部で接続する構造となっている。歯根を生体内部に埋め込んだとき、この複数の穴から細胞が入り込むことにより生体と一体化する。この歯根内部の複雑な形状は金属光造形複合加工機によって実現できるものである。今回、試作した人工歯根のサンプルは生体適合性という観点で今後さらに評価を行なっていく必要がある。

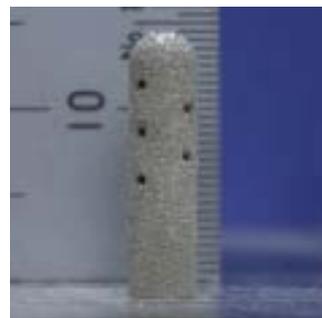


図 26 製作した人工歯根サンプル

また、人工骨のサンプルとして、大阪大学大学院の協力を得てチタン粉末により鳥の骨を金属光造形複合加工試験機で製作した。

製作した鳥の骨のサンプルを図 27 に示す。骨の内部は骨の強度に近づけるためにポーラス状(粗密度)に造形している。

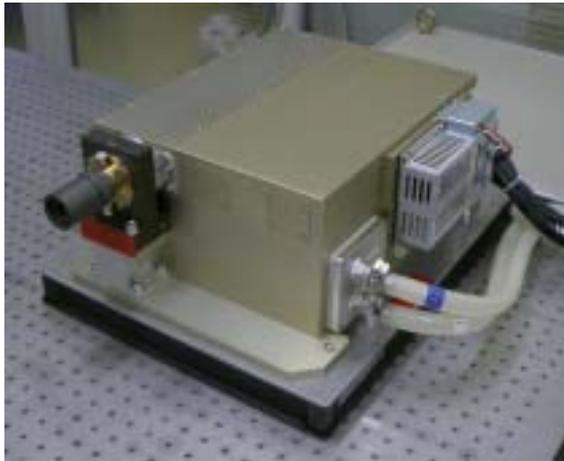


図 27 製作した鳥の骨のサンプル

今後は製作した骨の強度に関する評価や粉末材料及び他の生体材料への適合について引き続き調査・研究が必要である。

また A グループで開発した CW 型 Yb:YAG レーザを 0.3mm のマルチモードファイバで金属光造形複合試験機に接続した。

図 28 に CW 型 Yb:YAG レーザの外観写真を示す。CW 型 Yb:YAG レーザのヘッドは、非常にコンパクトであり電源を含め、従来使用していたランプ励起の Nd:YAG レーザより体積で 1/5 と省スペースを実現している。



(a)レーザーヘッド



(b)ヘッドと電源

図 28 CW 型 Yb : YAG レーザ発振器外観

金属光造形複合加工試験機での造形評価では、0.3mm のマルチモードファイバを使用していることもあり、従来使用していた Nd : YAG レーザとの明確な差は判断できなかった。しかしサイズとしては大幅に小さくなっており、ヘッドサイズは非常にコンパクトとなっている。但し、最大平均出力が 180 W までとなっており、今後はさらなる高出力化が望まれる。

5.2 フェムト秒レーザー援用光ナノ加工・改質実験装置の開発

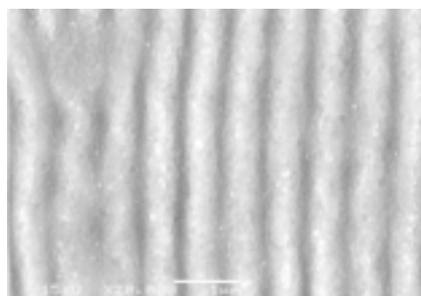
本事業ではこれまでの研究結果から、超短パルスレーザーを照射することで試料表層に微細周期構造が形成されることがわかった。この周期構造は、照射するレーザーの波長の 1/5 ~ 1 波長オーダー程度の周期であり、超短パルスレーザー特有の現象である。表層に周期構造を形成させることで、表面積の増大、摩擦係数の低減、潤滑油の保持などへの応用が考えられ、様々な分野への展開が期待できる。

本研究では、これまでの研究開発結果をもとに、試料表層に微細周期構造を形成させるフェムト秒レーザー援用光ナノ加工・改質実験装置を開発した。

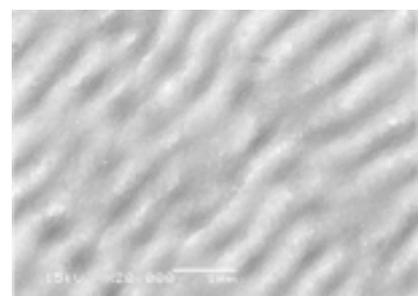
(1) 偏光制御機構

微細周期構造の形成はビームの偏光方向に依存性がある。図 29 に金属表層への微細周期構造の形成例を示す。

任意の周期構造パターンを形成するためには、偏光方向制御機構が必要とされる。加工プログラム中で、直線偏光の $0^\circ \sim 90^\circ$ 方向の任意設定、直線偏光と円偏光の切替えを行うために、 $1/2$ 板、 $1/4$ 板を自動回転ステ



(a) 直線偏光 90°



(b) 直線偏光 45°

図 29 金属 (Cu) 表層への微細周期構造の形成例

ージおよび切替え用フリッパーによって制御する機構とした。図 30 に偏光制御機構の構

成図を示す。

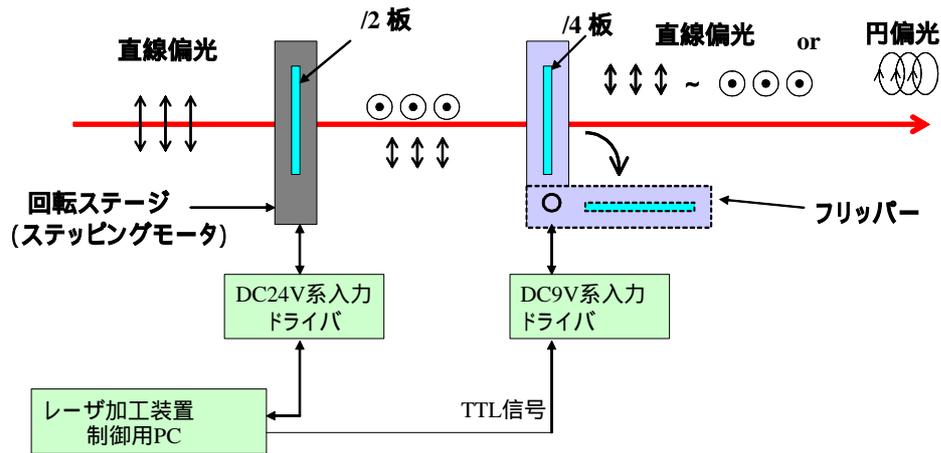


図 30 偏光制御機構の構成図

(2) ビーム整形機構

周期構造のパターン形成には均一な面加工が要求されるため、ビームの強度分布を一般的なガウシアン分布からトップフラット化するビーム整形機が必要となる。ビーム整形方法としては、これまでの研究結果を取り入れた、反射型の形状可変型ミラーによるビーム整形機構とした。図 31 にビーム整形機構の構成図を示す。

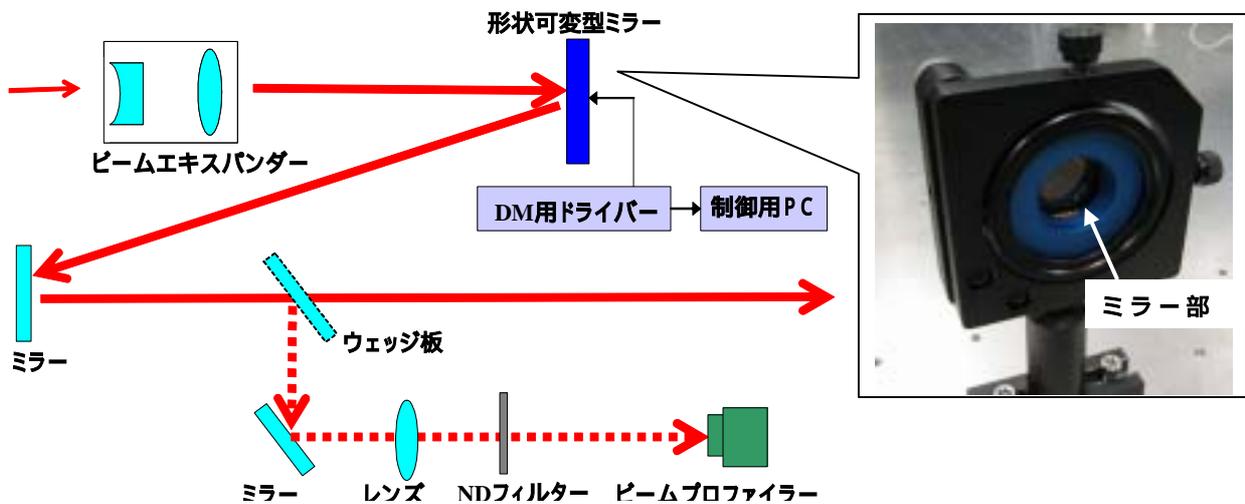


図 31 ビーム整形機構の構成図

(3) レーザ出力制御機構

微細周期構造の周期間隔は、照射レーザーの波長、エネルギーに依存性があるとされている。よって、高精度な周期構造パターンを形成させるためには、レーザー出力制御による出力安定化が必要となる。現状の Yb:YAG レーザにおいては、励起源（ここでは半導体レーザー）の出力を変えることでレーザーの出力を制御すると、ビームのモードが乱れや出力低下につながる。よって、本加工装置では、レーザー発振器の外部に偏光素子の組合せによる出力制御機構を設けた。また、レーザー出力をフィードバックすることで、出力安定化の機能を持

たせた．図 83 に出力制御機構の構成を示す．

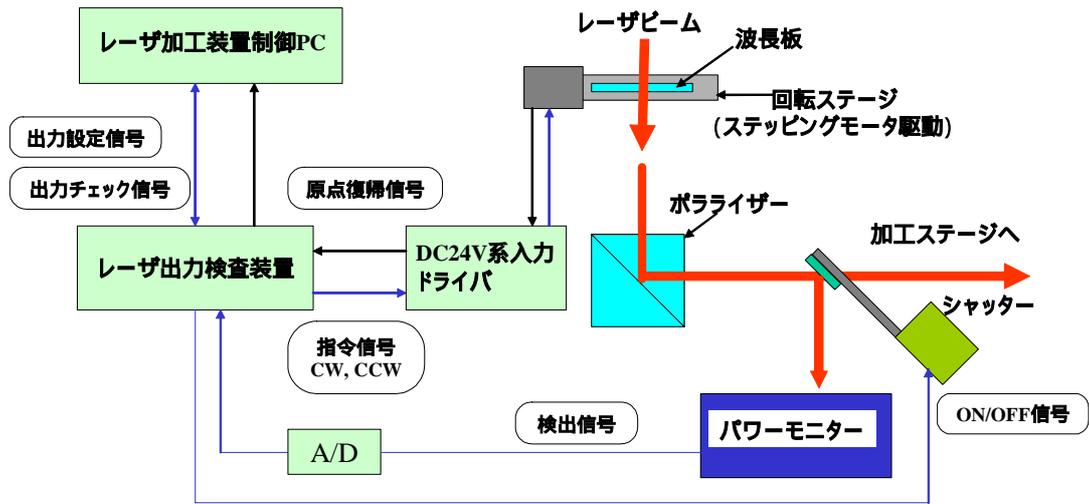
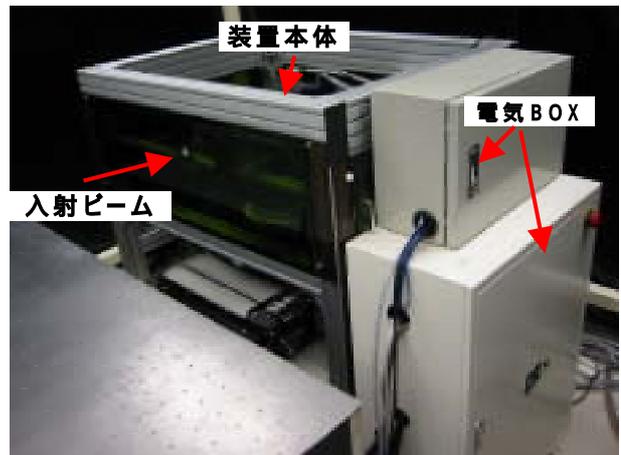


図 32 レーザ出力制御機構の構成図

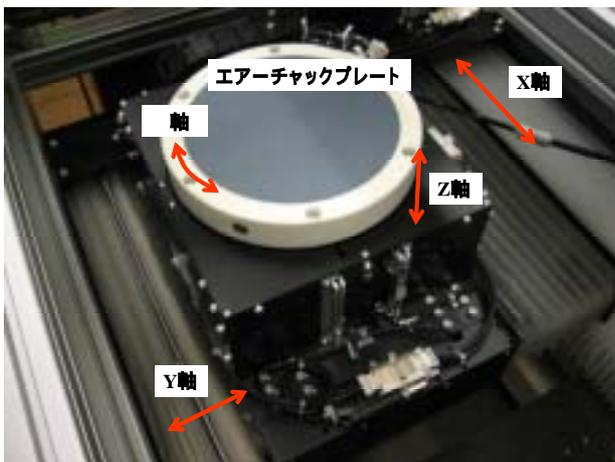
33, 表 11 に試作した表面ナノ加工装置の概観図および加工ステージの主な仕様をそれぞれ



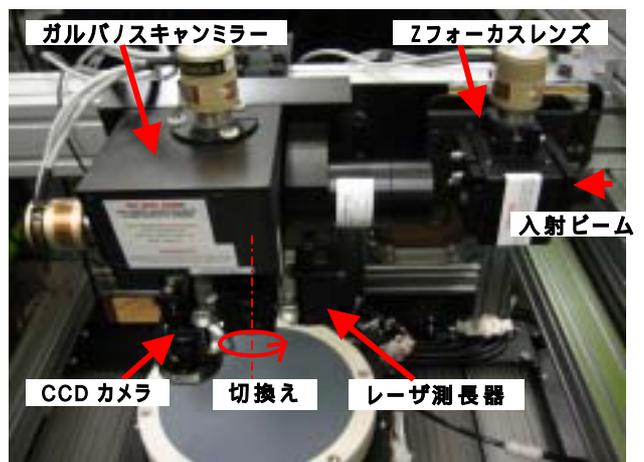
(a) Yb : YAG フェムト秒レーザーの概観図



(b) 加工ステージの概観図



©加工ステージの内部



(d) ガルバノスキャナーおよび観測機器の概観図

図 33 試作した表面ナノ加工装置の概観図

表 5 加工ステージの仕様

軸数			X / Y / Z / 4軸
軸移動量		mm	300/300/100
		deg	エンドレス
最大送り速度	X / Y / Z	mm/sec	500
		deg/sec	360
最大加速度	X / Y / Z	G	0.3
		G	0.3
位置決め精度	X / Y / Z	μm	6
		sec	±15
繰返し位置決め精度	X / Y / Z	μm	±1
		sec	±1
分解能	X / Y / Z	μm	0.1
		sec	0.3
軸真直度	X / Y / Z	μm	±5(フルストローク内)
軸精度	(面振れ)	μm	5(真空チャック最外径位置)
	(回転振れ)	μm	6
テーブルサイズ		mm	200
テーブル仕様			真空チャック(チャック面積 200mm) M6タップ仕様
ガルバノミラー	スキャンエリア	mm	150

加工ステージは、X Y Z 軸ステージに加え、ガルバノスキャンミラーを搭載しており、ビーム固定のステージ走査による加工とビーム走査による2パターンの加工が可能である。加工テーブルは、エアチャックタイプとM6タップ付タイプがあり、ワークによって交換が可能である。モニター機能としては、図33(d)に示すように、CCDカメラとレーザ測長器がある。CCDカメラの分解能は10μm以下であり、主にワークの位置決め・傾き補正に使用する。レーザ測長器については、ワークの厚さ測定および厚さ変更によるビームの照射位置の補正を行う。

6. 今後(フェーズ)の計画

目標： 金属光造形複合加工機の実用化

フェムト秒レーザ援用光ナノ加工・改質装置の実用

フェーズでは金属光造形複合加工試作機のさらなる実用化を目指し、金型やバイオマテリアルなど多くのアプリケーションへの適用に関して研究開発を進める。また鉄やチタン以外の金属粉末に関する研究や搭載するレーザの機能性・信頼性向上を進め、より多くの金属光造形複合加工アプリケーションを増やしていく。

また超短パルスレーザ加工装置についても、ドライエッチング加工や表面ナノ加工といったアプリケーションへの適用について、ビーム整形の自動調整や加工速度の高速化などを図り、実用化を目指した研究開発を進めていく。

7. 特記事項

金属光造形複合加工機

活用：金型製作，バイオマテリアルの製作，複雑な形状の金属部品の製作

製品化：金属光造形複合加工実用機(LUMEX-25C)を商品化

その他：平成16年度に文部科学大臣賞を受賞

短パルスレーザー・アブレーション加工試験装置

活用：ITO薄膜のドライエッチング，電子部品のスクライビングやトリミング

製品化：商品化準備段階。ユーザとの実用化試験を実施中。

その他：経済産業省の地域新生コンソーシアム研究開発事業に展開し試作機を開発
フェムト秒レーザー援用光ナノ加工・改質実験装置

活用：摺動部品における摩擦低減，大面積を必要とする電極・触媒の製作

製品化：現在のところ計画はない

その他：今後実用化を目指し機能・性能の向上を図る。