

微細加工用全固体紫外レーザー加工機 Meister 1000DF

Diode-pumped Solid-State Ultra Violet Laser
Micro Processing System



池田 直昭 赤羽 崇 井上 典亮
高橋 慎治 野田 修

全固体紫外レーザーを搭載した微細加工用レーザー加工機を開発した。レーザー部は当社で開発したレーザーダイオード励起の短パルスYAGレーザー発振器であり、CLBO結晶を用いて第4高調波（波長266 nm）の紫外レーザーを発生させる。本機はCLBO結晶によるYAG第4高調波を用いた本格的なレーザー加工機としては初めてのものであり、従来のCO₂レーザーやYAG第3高調波レーザー搭載の加工機に比べ短波長、短パルス化を実現した。本機を用いた微小貫通穴加工試験の結果、熱影響、加工残渣が極めて少ない高品質な加工が可能であることが確認でき、特に従来加工機では困難であった無機材料微細加工への適用有用性が確認できた。

1. はじめに

近年、電子機器の小型化に伴いプリント回路基板（PWB）の高密度化、多層化が進展したことを受けて微小穴あけを中心とした微細加工ニーズが拡大してきている。現在PWB穴あけには、従来の機械式ドリルに代わってCO₂レーザーが用いられているが、波長が10.6 μmと比較的長いため、①穴径微小化に限界がある、②加工物への熱影響が大きい、という問題があり、この解決策としてレーザーの短波長化が検討されている。ここで、短波長レーザーとしては、近年発展がめざましい非線形光学結晶と近赤外波長域のYAGレーザーを組み合わせた全固体紫外レーザーが有力候補と考えられている。この方式は、従来紫外レーザーの主流であったガス放電励起型のエキシマレーザーに対して、すべて固体媒質のみで構成できることから、省電力・省スペース、長寿命、メンテナンスの容易性といった特長があり、新しい産業用光源として大きな期待が寄せられている。

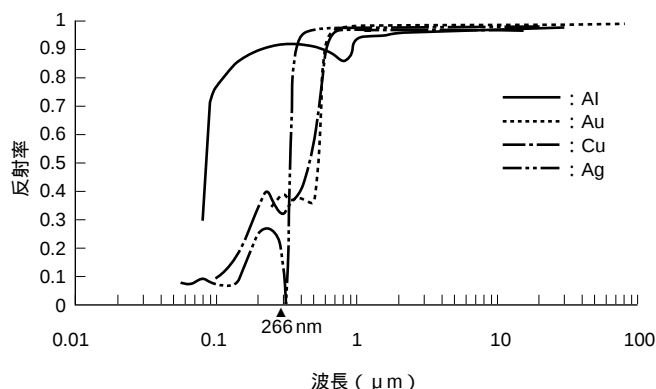


図1 各種金属材料反射率の波長特性¹⁾

2. 短パルス紫外光による加工

図1に代表的な金属材料の反射率の波長特性を示す。この図から、波長が短くなるにしたがって材料の反射率が低下することが分かる。このことは短波長のレーザーほど材料へのレーザーの吸収率が良くなることを意味している。実際の加工対象材料はPWBに使用される高分子材料から、金属、ガラス・セラミックスなどの無機材料、さらにはこれらの材料が積層された複合材料等多岐にわたっているが、金属同様に短波長ほど吸収率が高くなる傾向にある。図2には、レーザーの照射パワー密度と照射時間（レーザーのパルス幅）によるレーザープロセスの種別を示す。この図から、レーザーパルス幅を

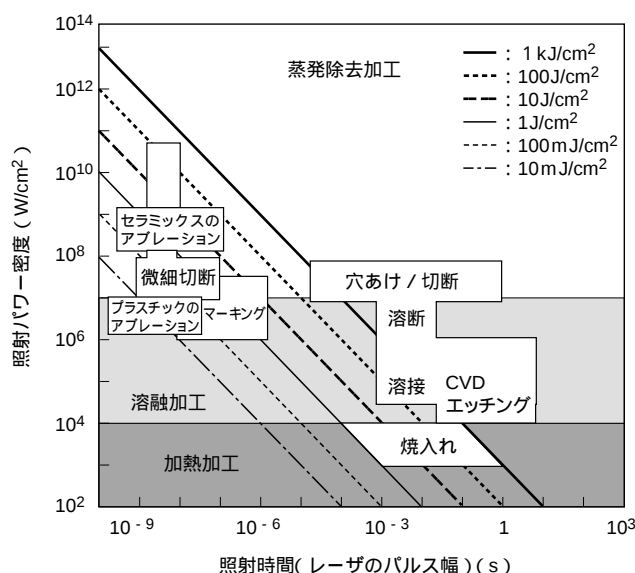


図2 レーザーパルス幅と照射パワー密度によるレーザープロセスの分類²⁾

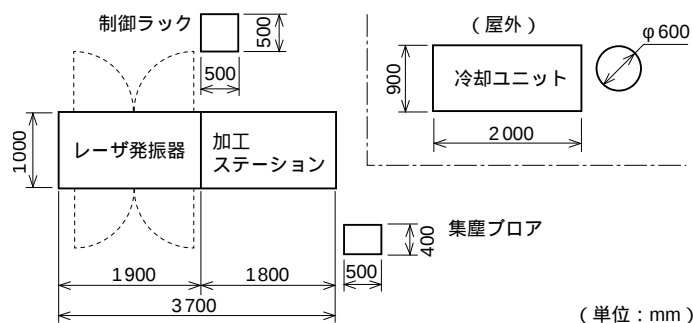


図3 レーザ加工機の配置構成

表1 レーザ加工機主要仕様諸元

レーザー発振器		システム	
型名	MASSL 100YF	外形寸法	W3700×D1000×H1500 mm
発振波長	266nm	装置重量	2100 kg
繰返し周波数	10～1000 Hz	付属機器	冷却ユニット
平均出力	Max. 2W		制御ラック
パルス幅	3.5nsec(半値幅)		集塵ブロア
加工ステーション		ユーティリティ	
型名	LDM GT	電源	200V, 3φ, 50/60 Hz
加工エリア	200mm×200mm		40kVA
最大送り速度	30 m/min.	冷却水	200 L/min., 20±0.1 °C
位置決め精度	±1 μm		純水

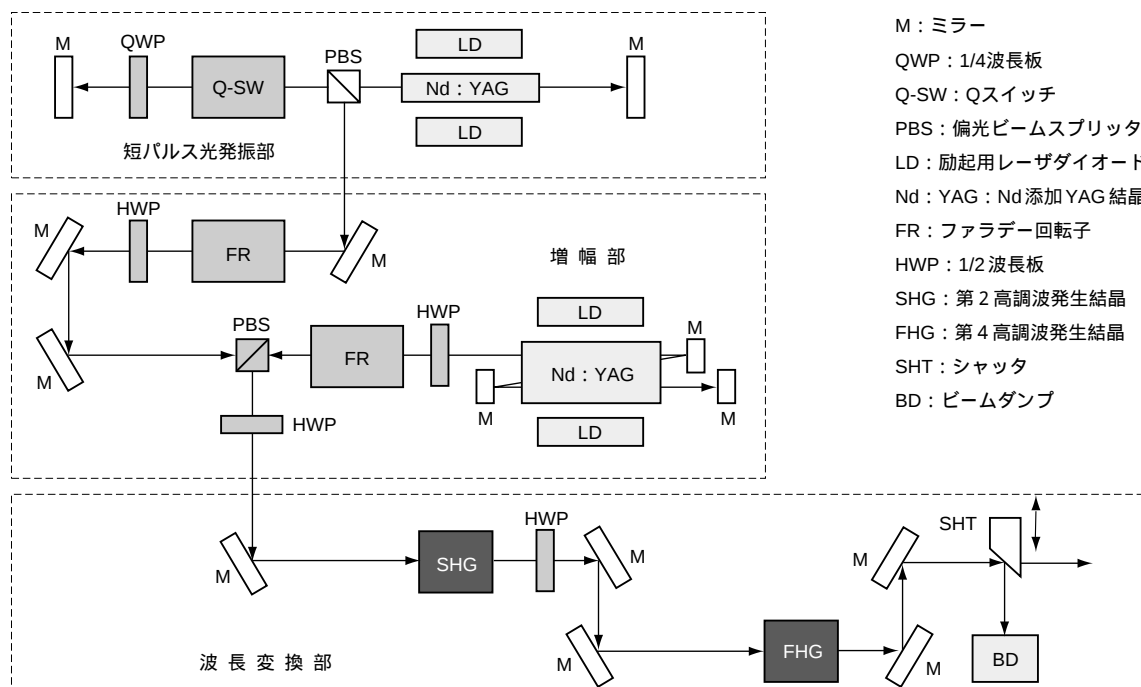


図4 レーザ発振器システム構成

M：ミラー
 QWP：1/4波長板
 Q-SW：Qスイッチ
 PBS：偏光ビームスプリッタ
 LD：励起用レーザーダイオード
 Nd：YAG：Nd添加YAG結晶
 FR：ファラデー回転子
 HWP：1/2波長板
 SHG：第2高調波発生結晶
 FHG：第4高調波発生結晶
 SHT：シャッター
 BD：ビームダンパー

短くして照射パワー密度を大きくすることにより加工プロセスは熱的加工から非熱的な蒸発除去加工（アブレーション加工）へ移行し、微細加工に適した加工となることが分かる。以上より、本機では既存のレーザー加工機に比べてより短波長化、短パルス化を指向することとし、波長はYAG第4高調波の266 nm、パルス幅は10 nsec以下に設定した。

3. 装置構成概要

図3に本機の配置構成を示す。加工機本体はレーザー発振器と加工ステーションから成る。本機全体の監視・制御及び運転操作は制御ラック内のパソコンを介して行う。付属機器としては、レーザー発振器用冷却ユニットと加工ステーションの加工屑回収用の集塵ブロアが設置される。表1に本機の主要仕様諸元を示す。

4. レーザ発振器

4.1 システム構成

図4にレーザー発振器のシステム構成を示す。レーザー発振器

は、①短パルス光発振部、②増幅部、③波長変換部、から構成される。以下に各部の構成と機能について説明する。

4.2 短パルス光発振部

対向する2枚の全反射ミラーで構成される光学共振器中に励起モジュール、Qスイッチ、偏光素子（偏光板、偏光ビームスプリッタ）が配置される。励起モジュールは、レーザーダイオード（LD）光源でネオジウム（Nd）を添加したイットリウム・アルミニウム・ガーネット（YAG）結晶を励起して波長1064 nmの近赤外光を発生させる。この赤外光は光学共振器中で増幅され、高電圧パルスで駆動されるQスイッチと呼ばれる電気光学素子と前述の偏光素子の組合せにより、短パルスレーザー光として切り出される。本機では、耐光強度の高いQスイッチ素子と短パルス駆動時でも安定に動作可能な高電圧回路を採用したことにより、従来レーザー発振器に比べて1/10程度まで短いパルス幅（7 nsec）のレーザー発生を実現している。

4.3 増幅部

増幅部では発振部のパルス出力を光増幅する。増幅部の励

起モジュールは発振部の励起モジュールと基本的に同一構成であるが、増幅率を稼ぐためにYAG結晶寸法を大型化するとともに光励起用LDを高出力化し、光パルスがYAG結晶中を複数回往復する方式を採用している。

4.4 波長変換部

波長変換部では、増幅部の出力光を非線形結晶と呼ばれる特殊な光学結晶を通過させることで入力レーザーの短波長化を行っている。図5に示すように、まず第2高調波発生(SHG)結晶で入力波長を1/2にし、次に第4高調波発生(FHG)結晶で波長をさらに1/2とすることで、近赤外域の波長1064 nmのレーザーを深紫外域の266 nmにまで短波長化する。SHG結晶及びFHG結晶には、それぞれLBO(化学式: LiB_3O_5)、CLBO(同 $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$)と呼ばれる人工的に育成された光学単結晶を使用している。CLBO結晶³⁾⁽⁴⁾は日本で発明された高性能の紫外光発生用結晶である。この結晶は吸湿により劣化しやすい性質を持つ上、波長変換特性確保のために温度制御が必要である等、取扱いが難しい。このため、まだこの結晶を搭載したレーザー加工機はほとんど無かったが、当社では結晶を常時 150 ± 1 に維持するヒートシンク型結晶ハウジングを独自に開発し、結晶の湿分除去と同時に温度安定化を実現している。

以上の波長変換の過程でレーザーパルス幅は段階的に圧縮され、紫外レーザー出力段でのパルス幅は3.5 nsecまで短縮される。このパルス幅は、全固体紫外レーザー発振器としては最短の部類に入る。また、紫外レーザーの最大パルスエネルギーは2 mJ、ピークパワーは0.57 MWである。この値は従来の代表的なYAG第3高調波レーザー発振器と比べても10倍以上の値である。

5. 加工ステーション

5.1 システム構成

図6に加工ステーションのシステム構成を示す。レーザー発

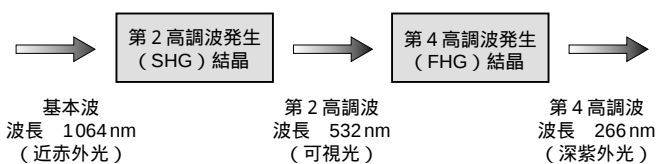


図5 波長変換プロセスの原理

振器から出力された紫外レーザーは出力調整用アッテネータ、ビーム拡大光学系、折返しミラー、直交2軸構成の可動ミラー（ガルバノミラー）を経て集光レンズでXY可動テーブル上のワークに集光照射される。XY可動テーブルは平面サーボモータ駆動方式であり、テーブル位置検出をレーザー干渉計で行うことにより $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下という極めて高い位置決め精度を実現している。下流の折返しミラーの透過側にはCCDカメラが設置されており、ワークの加工状況を制御ラック内のモニタ画面にてリアルタイムで監視することができる。

5.2 制御系

レーザー発振器の各種パラメータ設定、レーザー出射制御、出力調整用アッテネータ・可動ミラー・XY可動テーブルの駆動制御等はすべて制御ラック内のパソコンにより集中監視・制御、操作指令を行うようになっている。加工形状は、あらかじめ専用の加工プログラムで指定することができる。

6. 微細加工応用例

本機を用いて実施した微細加工応用例を以下に示す。照射パワー密度は最大で $40 \text{ GW}/\text{cm}^2$ であり、加工対象と加工内容に応じて最適化を行った。図7は、フレキシブル電子基板等に使用される高分子フィルム（東レ・デュポン社製ポリイミド、厚さ $25 \mu\text{m}$ ）に対してレーザー光軸を可動ミラーで円形にスキャンしたトレパニングと呼ばれる加工による貫通穴（直径 $100 \mu\text{m}$ ）の走査電子顕微鏡（SEM）写真である。こ

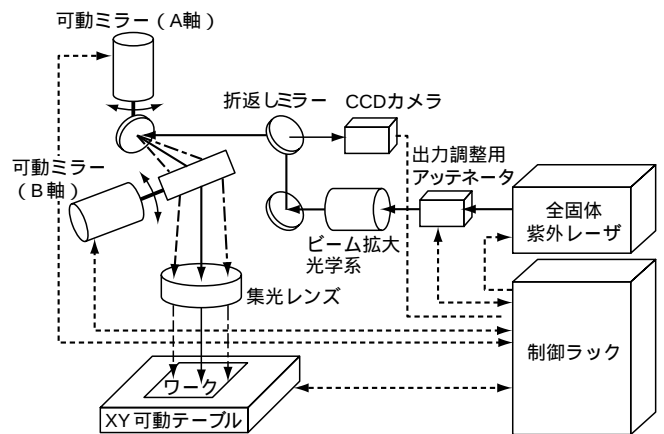
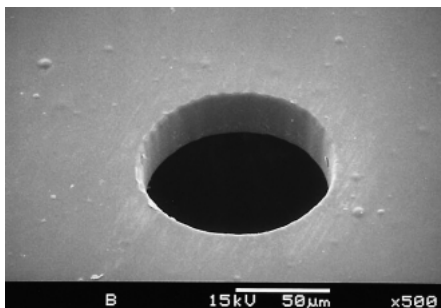
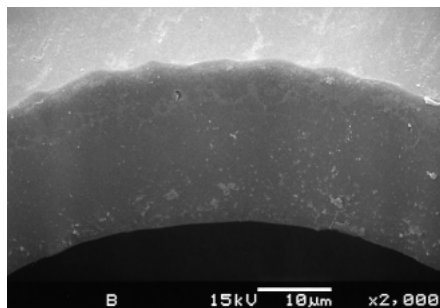


図6 加工ステーションシステム構成



(a) ポリイミド加工例 SEM R1 020902



(b) ポリイミド加工例 SEM拡大 R1 020902

図7 トレパニング加工例 (a)はポリイミドフィルム（ $25 \mu\text{m}$ 厚）における直径 $100 \mu\text{m}$ 貫通穴。(b)は加工穴エッジ部の拡大で、加工エッジ部にはデブリがなくシャープな形状である。

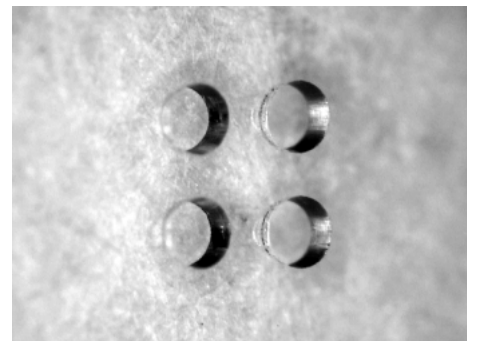


図8 ガラスへの貫通穴加工例 ホウケイ酸ガラス（ $120 \mu\text{m}$ 厚）における直径 $300 \mu\text{m}$ 貫通穴。

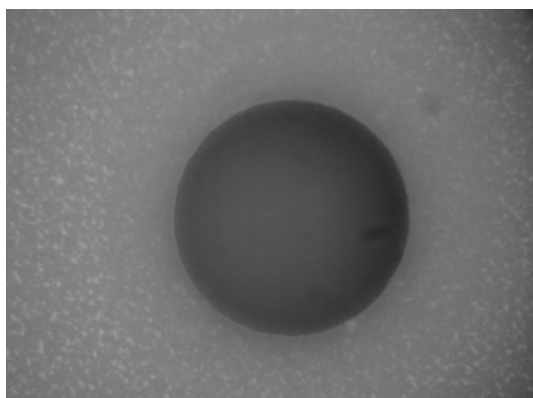


図9 セラミックスへの貫通穴加工例 セラミックス (100 μm 厚) における直径300 μm 貫通穴。

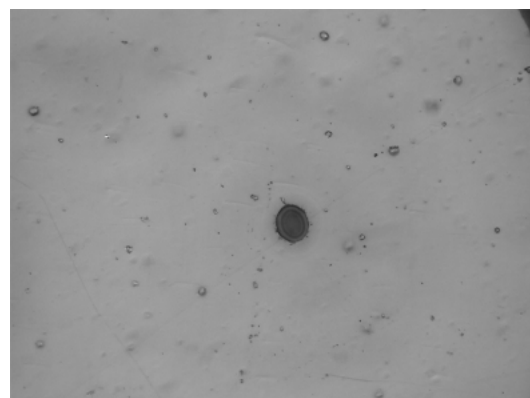


図10 同軸照射加工例 ポリイミドフィルム(25 μm 厚) における直径20 μm の貫通穴。

の結果において加工部周辺には熱影響による黒化や加工残渣(デブリ)は認められず、加工穴エッジ部が極めてシャープであることが確認できた。図8, 図9はそれぞれ、光ファイバ用コネクタ等光通信用部品への適用が見込まれているガラス(厚さ120 μm)、セラミックス(厚さ100 μm)へのトレパニングによる貫通穴(直径300 μm)加工例である。ガラスやセラミックス等の無機材料はマイクロドリルによる機械加工が困難であり、加工できた場合でもクラックが発生しやすいという問題があった。図8, 図9の加工結果では、加工部周辺の黒化、デブリ、クラックなどの発生はいずれも確認されなかった。また、どの材料についても貫通穴加工における形状精度は、真円度95%以上と良好な結果を得た。一方、図10はレーザ光軸を固定して厚さ25 μm のポリイミドフィルムに対して行った同軸照射加工の結果である。ここで、貫通穴直径は約20 μm であり、この穴径はCO₂レーザ加工機による典型的な加工穴径50~70 μm に比べて小さいことが確認できた。本機の設計上の最小集光径は約10 μm であるが、実際にはレーザの空間モードがTEM₀₀と呼ばれる釣鐘型の分布となっており、分布の裾野の部分でも加工が行われてしまうため加工穴径は設計最小集光径よりも大きくなっている。さらなる加工穴径の微小化は、レーザ空間モードを平坦化するビーム整形光学系の導入により可能になると考えている。

7. ま と め

短波長、短パルスの全固体紫外レーザを用いることで、従来微細加工が困難とされてきた、ガラスやセラミックスといった無機材料に対しても高品質な微細加工が可能であることが確認できた。

本報で紹介した全固体紫外レーザ加工機の初号機は、既に尼崎市殿に納入され、(財)近畿高エネルギー加工技術研究所にて委託試験加工業務に供されている。今後、本機の適用材

料の拡大と加工技術の高度化検討を進め、微細加工分野のニーズにマッチした製品としてシリーズ化していく所存である。

最後に、YAGレーザ第4高調波発生用のCLBO結晶取扱い技術に関して大阪大学大学院工学研究科電気工学専攻の佐々木孝友教授、森勇介助教授にご指導、ご助言を頂いた。紙面を借りて謝意を表したい。

参考文献

- (1) Y.S.Touloukian et.al., Thermophysical Properties of Matter, TPRC Data Services Vol.7, IFI Plenum (1970)
- (2) 電気学会編, レーザアブレーションとその応用, コロナ社(1999) p.3
- (3) 森勇介ほか, 紫外光発生用の新しい非線形光学結晶 CsLiB₆O₁₀, 応用物理 Vol.66 No.9 (1997) p.965
- (4) 佐々木孝友, 波長変換用非線形光学結晶, レーザー研究 Vol.27 No.5 (1999) p.373



池田直昭
神戸造船所
新製品・宇宙部
高密度エネルギー装置開発グループ



井上典亮
神戸造船所
新製品・宇宙部
高密度エネルギー装置開発グループ



赤羽崇
神戸造船所
機械・環境プラント部
機械設計課



高橋慎治
神戸造船所
機械・環境プラント部
機械設計課



野田修
財団法人近畿高エネルギー加工技術研究所
ものづくり支援センター技術開発・試作支援室