

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

## 超硬合金形彫用複合レーザー加工機の開発

### 研究開発成果等報告書

平成26年 3月

委託者 近畿経済産業局

委託先 特定非営利活動法人産学金連携センター

## 目 次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制	5
1-2-1 研究組織及び管理体制	5
1-2-2 管理員及び研究員	6
1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名	6
1-2-4 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項	7
1-3 成果概要	7
1-4 当該研究開発の連絡窓口	7
第2章 本論	8
2-1 ガルバノスキャニング機構を付加した複合レーザー加工機の開発	8
2-1-1 レーザー加工機の開発	8
2-1-2 LD 励起 Nd:YAG レーザー発振器の開発について	11
2-1-3 3軸ガルバノユニットの開発について	11
2-1-4 制御回路の開発について	12
2-1-5 複合レーザー加工機の改造	12
2-2 レーザー加工条件の開	14
2-2-1 超硬各材質への基礎実験	14
2-2-2 光学系の調整	16
2-2-3 ダイス鋼へのレーザー形彫加工条件の開発	17
2-3 コーナー部分の加工精度向上のためのレーザー入射角の調整	18
2-3-1 ガルバノ照射角度の調査	18
2-3-2 壁面バリを除去する為のガルバノスキャニング検討	19
2-3-3 超硬合金形彫時のバリ軽減のための輪郭加工テスト	19
2-4 プログラミング・ソフトの導入及び改良	20
2-4-1 レーザー制御用プログラムの作成	20
2-4-2 インターロックの追加	21
2-4-3 加工プログラムの作成	21
2-5 試作品のフィードバック評価、放電加工との取合の最適化	22
2-5-1 レーザー複合加工による超硬合金ロールの試作加工	22
2-5-1-1 超硬合金製アニロックスロールの開発	22
2-5-1-2 超硬溶射皮膜に対してのレーザー加工条件開発	22
2-5-2 ユーザー評価	25
2-5-3 フィードバック評価	25
2-5-4 放電加工等他の加工方法との取り合いの検討	26
第3章 全体総括	27

## 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

#### 1) 研究開発の背景

自動車、電機機器等の川下企業でニーズの高い精密複雑形状部品を経済的に製造する超硬合金工具を用いた塑性加工プロセスに適合するロールや金型等の超硬合金工具に精密複雑な形彫加工ができる複合レーザー加工機を開発する。

超硬合金は加工法が限定されている。金型等奥行きがあり、複雑な形状を有するものは放電加工が主流で、線、面状の加工はダイヤモンド砥粒を使った研削・研磨法で行われている。平滑な表面に複雑な形状を形成する加工は、両加工法の組合せで行われ、コスト面、納期面で課題があるばかりでなく、ものづくり企業間での中間加工品の受け渡しなど、川下企業にとっても問題となっている。

これに対してレーザー加工法では加工アタッチメントを切り替えることで、面加工も局所的な複雑加工も可能である。レーザーはコヒーレントな光を発振器により発生し、微少部分に大量のエネルギーを投入し、材料を溶解しアシストガスにより除去して所用の加工を行う。レーザー加工はこれまで切断、溶接の加工法が主力であったが、ビームの材料への進入深さを精密に調整することにより、表面研削、表面造形の加工が可能になった。このため、新しい切削加工技術として、超硬合金形彫用複合レーザー加工機の開発を行う。

#### 2) 研究の目的

本研究開発は複合レーザー加工機の開発により上記の課題に対応するとともに加工ロールにより高強度材料に圧延加工を施すもので塑性加工技術の向上を通じて、ものづくり基盤技術の高度化に資する。こうした加工技術をベースにして将来的には複雑形状を有する超硬合金金型を直接レーザー加工し、放電加工法との複合加工あるいは放電加工に代替する。

#### 3) 研究の概要

自動車、電機機器等の川下企業でニーズの高い精密複雑形状部品を経済的に製造する超硬合金工具を用いた塑性加工プロセスに適合するロールや金型等の超硬合金工具に精密複雑な形彫加工ができる複合レーザー加工機を開発する。これにより、放電加工、研削・研磨加工法で対応していた形彫加工を低コスト、短納期で行う。このため以下の4項目について技術開発を行う。

- ① ガルバノスキャニング機構を付加した複合レーザー加工機の開発
- ② コーナー部分の加工精度向上のためのレーザー入射角の調整
- ③ プログラミング・ソフトの導入及び改良
- ④ レーザー複合加工による超硬合金ロールの試作加工とフィードバック評価

#### 4) 所在地

##### ① 事業管理者

特定非営利活動法人産学金連携センター  
(最寄り駅: 東京メトロ 丸の内線 新大塚駅)

〒170-0005 東京都豊島区南大塚2丁目14番12号  
YSビル 101号室

②研究実施場所

株式会社ヤスオカ(最寄り駅:JR関西本線 河内堅上駅)

〒582-0023 大阪府柏原市国分東条町 4331-1

〒564-8680 国立大学法人大阪大学大学院工学研究科電気電子情報専攻  
(最寄り駅:阪急千里線 北千里駅)

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1

5)委託期間

平成 23 年9月7日から平成 26 年3月31日 まで

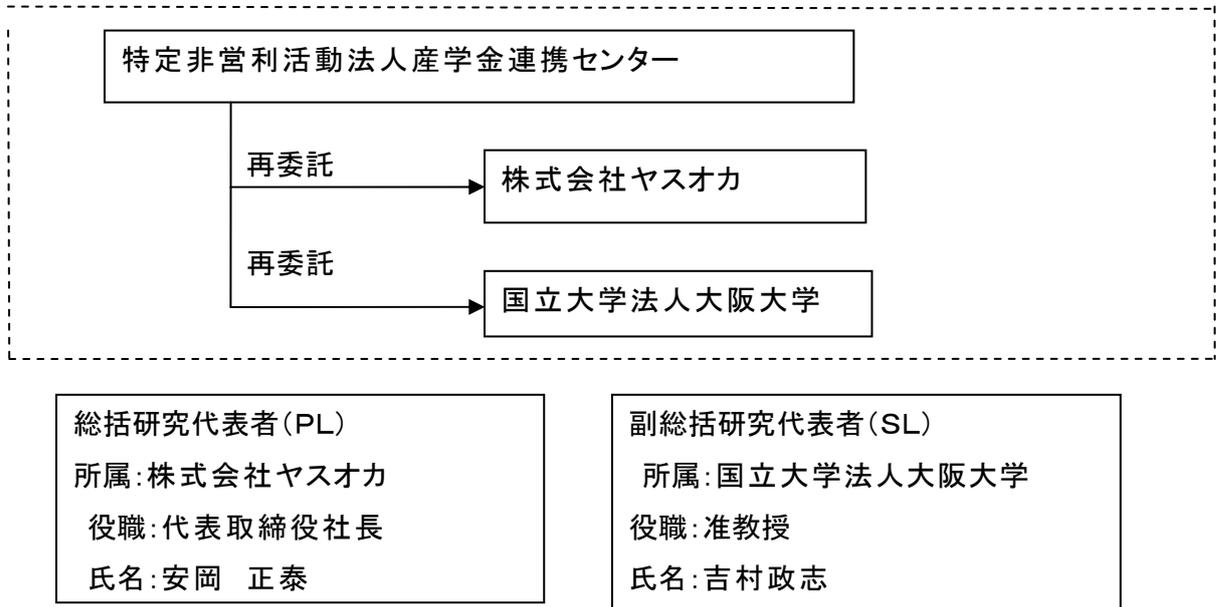
6)実施計画日程

実施内容	H23				H24				H25			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
①レーザー加工機の開発		●	→									
②レーザー加工条件の開発		●	→									→
③コーナー部分の加工精度向上のためのレーザー入射角の調整		●	→									→
④プログラミング・ソフトの導入及び改良					●	→						→
⑤試作品のフィードバック評価、放電加工との取合の最適化										●	→	

## 1-2 研究体制

### 1-2-1 研究組織及び管理体制

#### 1) 研究組織(全体)



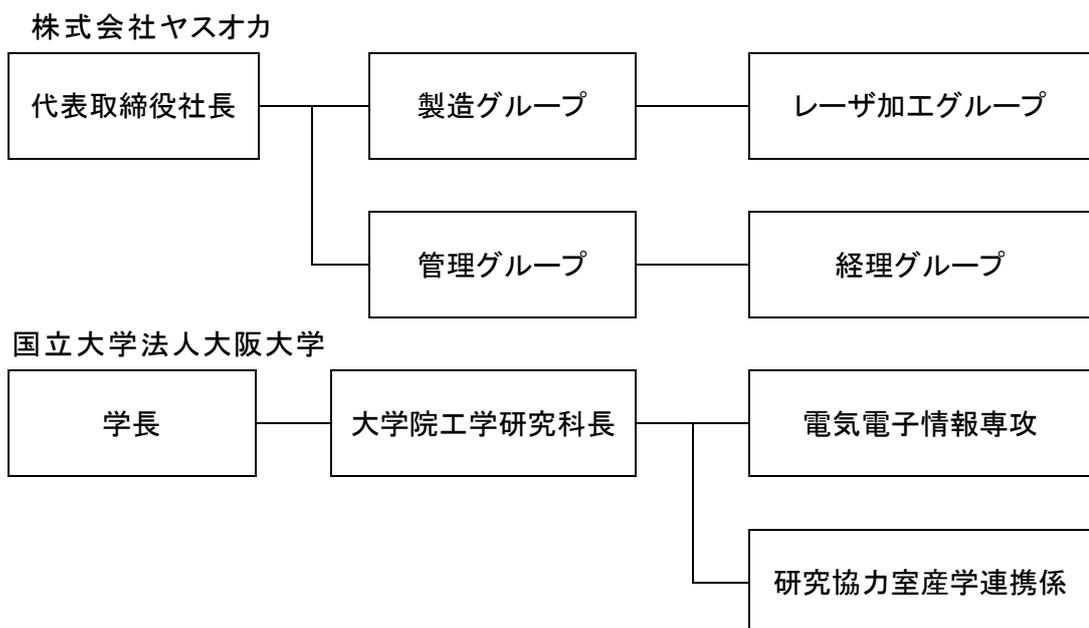
#### 2) 管理体制

##### ① 事業管理者

[特定非営利活動法人産学金連携センター]



##### ② (再委託先)



1-2-2 管理員及び研究員(氏名, 所属・役職, 実施内容)

【事業管理機関】特定非営利活動法人産学金連携センター

① 管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小島 彰	理事長	⑤
伊藤 瑛二	産学連携推進部長	⑤
佐藤 麻子	産学連携推進部 管理員	⑤
浜田 ちひろ	産学連携推進部 管理員	⑤

【再委託先】

株式会社ヤスオカ

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
安岡 正泰	代表取締役社長	① ② ③ ④
安岡 直樹	専務取締役	① ② ③ ④
渡川 和哉	レーザ加工グループ 加工担当	① ② ③ ④

国立大学法人大阪大学

② 研究員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
吉村 政志	大学院工学研究科電気電子情報専攻 准教授	① ③ ④

1-2-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

特定非営利活動法人産学金連携センター

(経理担当者) 理事長 小島 彰

(業務管理者) 理事長 小島 彰

(再委託先)

株式会社ヤスオカ

(経理担当者) 管理担当 安岡 洋子

(業務管理者) 代表取締役社長 安岡 正泰

国立大学法人大阪大学

(経理担当者) 大学院工学研究科 研究協力室産学連携係 堂田 貴士

(業務管理者) 大学院工学研究科 研究科長 掛下 知行

#### 1-2-4 他からの指導・協力者名及び指導・協力事項

##### アドバイザー

機関名	協力者名	指導・協力内容
株式会社 シルバーロイ	常務取締役 高見康博	超硬合金の材料特性、被加工性、製品種類等、超硬合金に関する情報及び材料の提供

#### 1-3 成果概要

本研究開発のレーザー加工機は、円筒形状ワークに対して精密な部品加工を可能ならしめるためワークに対するレーザー光の入射角を NC 軸(回転軸)&(傾斜軸)で制御できるような加工物ワークテーブルを整備し、大きなワークから小さなワークまで加工できるような汎用性と5軸(同時4軸)までの多軸制御を実現できる装置として開発された。レーザーヘッドに関してはレーザーの焦点距離をレンズ光学系で制御し、ガルバノZ軸機構を使用した深彫り加工を実現させている。また加工装置としてのみでなく、研究用途として検査機器や解析装置を搭載させレーザー加工技術の開発に関しても大きく前進することが出来た。ガルバノ光学系を使用した加工に関しては、これまで 5mm 角の試料の加工時間883秒に対して新規開発機械での加工時間は460秒となり、30%以上の加工時間削減させ、script プログラムで加工データを調整し、コーナー部分の加工精度を高める事を実現した。ノズル光学系においては 10000mm/min でレーザー加工を行うため、加工テーブルの再調整とプログラミングソフトを修正し、超硬合金製アニロックスロールの研究開発を進めることが出来た。また、展示会での出展に際し、ガルバノスキャンニングとワークテーブルの回転を同期して加工できるプログラムを作成し、展示会で加工デモを実演することができた。その他、圧延加工用の形彫ロールを放電加工品で使用しているユーザから、レーザー形彫による圧延ロールの試作依頼を受け現在評価中である。今後はレーザー加工のメリットを生かしたサンプルの作成を手がけて行くものとする。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

特定非営利活動法人産学金連携センター

産学連携推進部 部長 伊藤瑛二

Tel:03-3592-1381

Fax:03-3592-1285

e-mail: [ito.eiji@nifty.com](mailto:ito.eiji@nifty.com)

## 第2章 本論

### 2-1 ガルバノスキャニング機構を付加した複合レーザー加工機の開発

#### 2-1-1 レーザー加工機の開発

株式会社ヤスオカ(以下ヤスオカ)ではこれまでランプ励起の Nd:YAG レーザー発振器や LD 励起の Nd:YAG レーザー発振器を用いて様々な形彫り加工を行ってきた。発振器は重量がある為に機械に固定され、固定光学系と呼ばれていた。

固定光学系での装置構成では加工対象(以降ワークと呼ぶ)を移動させる必要がある為、汎用性に欠ける面があった。また、多軸制御を行う場合にも装置が複雑になるというデメリットが

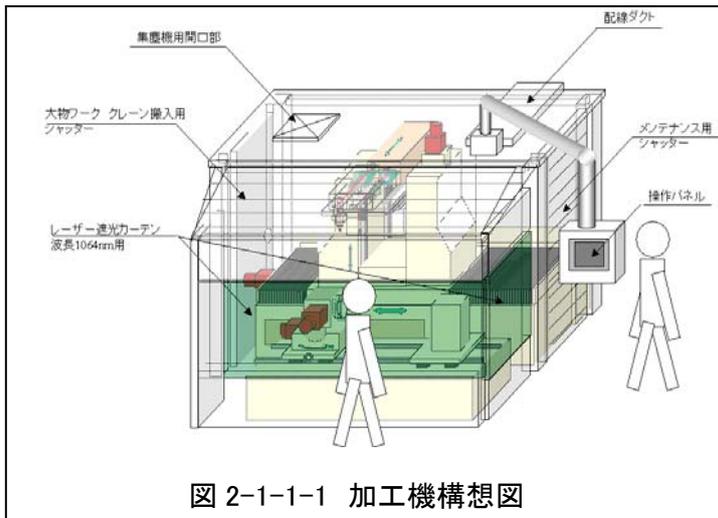


図 2-1-1-1 加工機構想図

あった。本研究開発のレーザー加工機は、レーザーを搭載したレーザーヘッドを駆動させ、大きなワークから小さなワークまで加工できるような汎用性と5軸(同時4軸)までの多軸制御を実現できる装置としての開発を目指すものとする。

左記図 2-1-1-1 参照

当初はファイバーレーザー発振器を搭載する事も検討していたが、本開発においてガウシアンビームが必要との考えに至ったため、フラットトップビームであるファイバーレーザー発振器

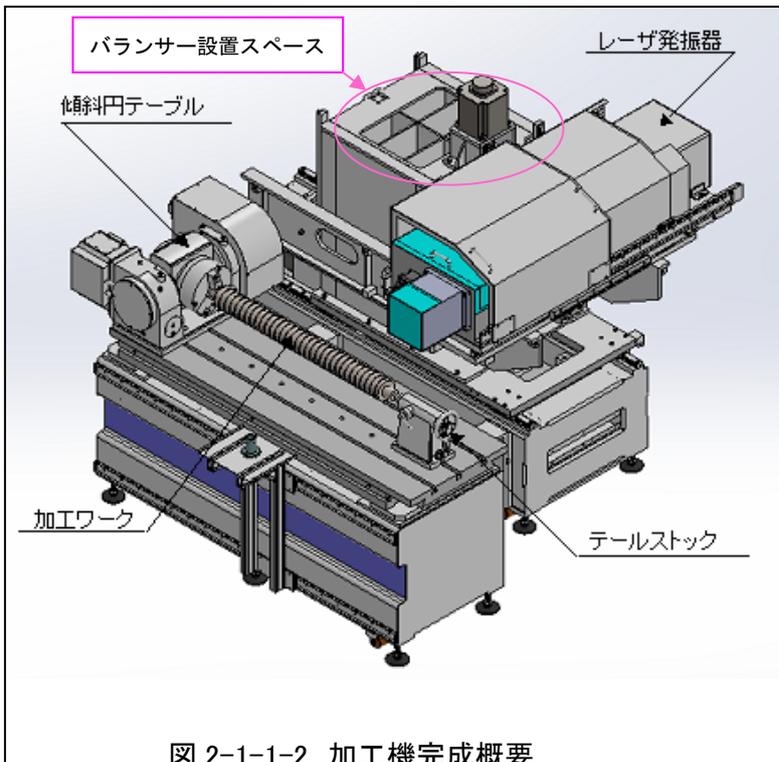


図 2-1-1-2 加工機完成概要

での検討を打ち切り、LD 励起レーザー発振器での設計を進める事とした。開発にあたっては、レーザーヘッドを駆動させる Z 軸と Y 軸の取り合い設計が非常に難航したが、最終的には左記の図 2-1-1-2 に示す様に Balancer を搭載できるスペースを設け、Z 軸を補助する機構とした。

ワークテーブルの開発に際しては以下の機構を付加することを目指した。(左記図 2-1-1-3

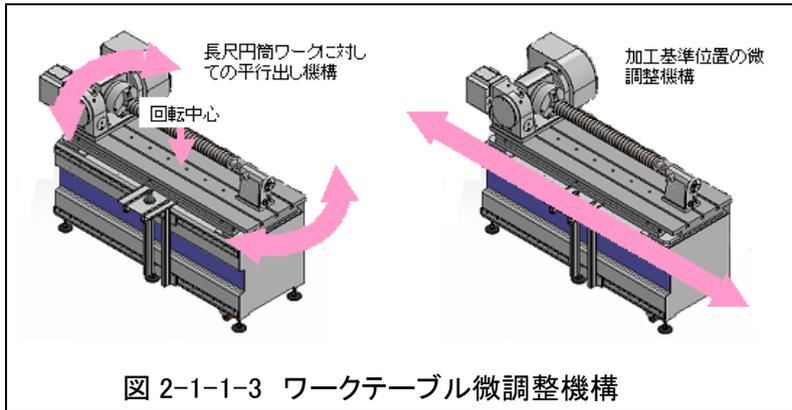


図 2-1-1-3 ワークテーブル微調整機構

参照) 下記左図は長尺物ワークを長手方向に加工する際のズレを補正するための回転機構で、右図が加工位置の基準を変更する際のスライド機構となる。

回転軸&傾斜軸に関しては NC 傾斜円テーブル(下記図 2-1-1-4 参照)を選定し、CNC 制御装置に合わせて、回転角度検出器を搭載しフルクローズドループ制御を実現する仕様とした。

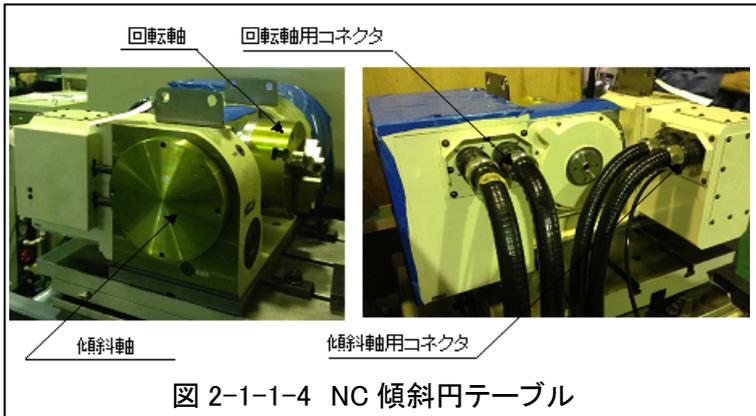


図 2-1-1-4 NC 傾斜円テーブル

ただし、回転軸に関しては高速な回転を使用する様な加工ではフルクローズドループ制御は対応できないので、高速な回転を必要とする加工に関してはセミクローズドループ制御に変更するものとした。

スライドテーブルの製作に当たっては NC 傾斜円テーブルとテールストックとのセンター位置を合わせるために T スロット溝を付加した仕様とした。(図 2-1-1-5 参照)

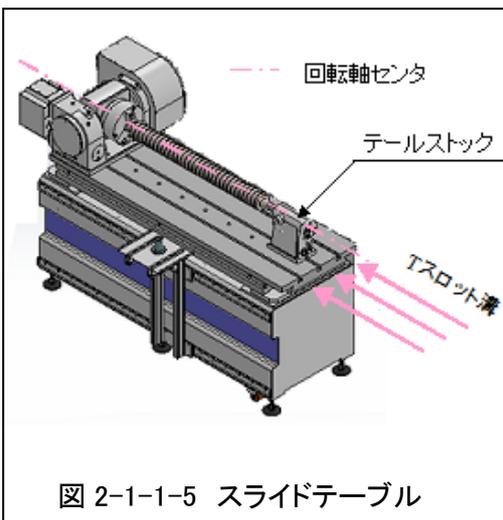


図 2-1-1-5 スライドテーブル

スライドテーブル材質に関しては剛性を高めるため、鋳物を使用したスライドテーブルとしており、ベッドに関しては角パイプを使用した剛性のあるベッドとした。テールストックに関しては長尺物の円筒ワークに対応するため、NC 傾斜円テーブルと同一ライン上の T スロット溝にはめ込む形とし、NC 傾斜円テーブルの回転軸センターとテールストックの超硬レースセンターのセンター位置と同一ライン上に設置できる仕様とした。

本研究開発で実施する様なレーザー形彫加工においては、加工の際に非常に微細な粉塵が発生する。特にタングステンの加工においては金属の酸化を促進させるガスが発生していることが確認されているために、レーザー形彫加工においてはステンレスなどの耐食性の強い金属を使えないような箇所(ボールネジや LM ガイドなど)にもカバーが必須となる。レーザー発振器などの光学部ユニットはアルミやステンレスを主体に装置が構成されているので、

粉塵からの保護を目的とし、ボールネジやLMガイドなどの駆動部をレーザー彫削加工の際に発生する加工ダスト(粉塵)と加工ガス(酸化促進)を防止する事に重点を置いた。

a. 光学部ユニットのカバーについて

光学部ユニットに関しては大きく分けてレーザー発振器と3軸ガルバノユニットの2つからなっている。これらはメンテナンスの際にカバーを上部に開く必要があるため、光学部ユニットのカバーに関してはメンテナンス作業の際、レーザー発振器と3軸ガルバノユニットのカバーを上部に開く事が出来るスペースを設ける仕様とした。(図 2-1-1-6 参照)また、カバーを

閉じた際には加工点観察用 LED 照明装置の操作は出来なくなるため、タッチパネルから照明の操作ができるように制御を修正した。

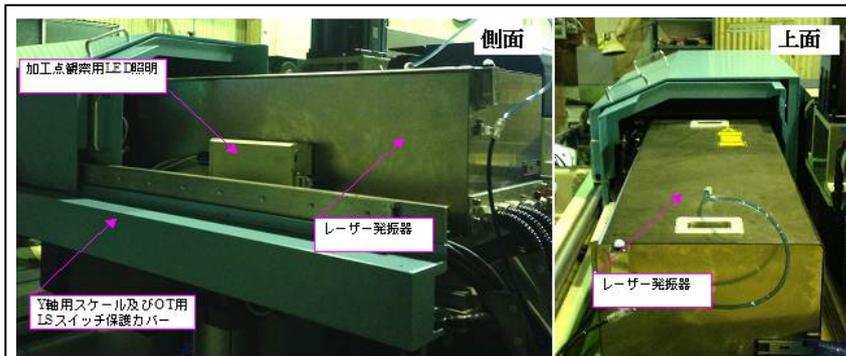


図 2-1-1-6 レーザー発振器メンテナンス カバー開放時

b. 駆動部のカバーについて

X 軸用のカバーは重量物落下防止用に鉄製カバーを覆ったうえでジャバラカバーにて防塵対策を行った。Y 軸と Z 軸に関してはそれぞれが関連性を持っているので、全体を覆うようなカバーを取り付けた。(図 2-1-1-7)カバーを取り付けた全体概要を図 2-1-1-8 に記す。

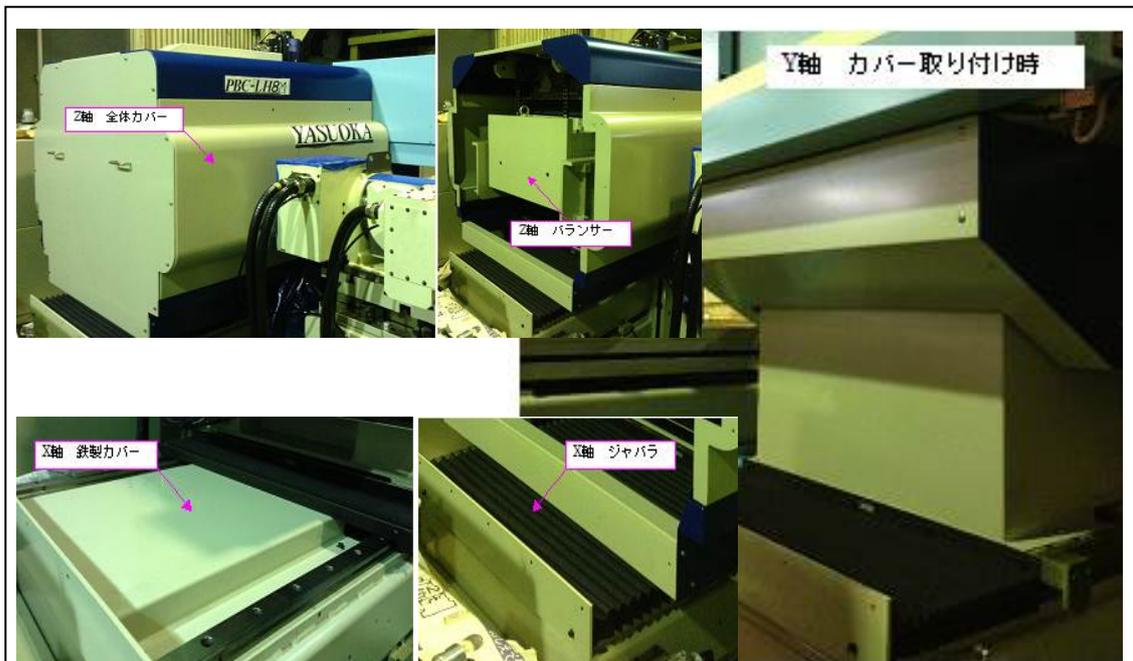


図 2-1-1-7 駆動部カバー画像

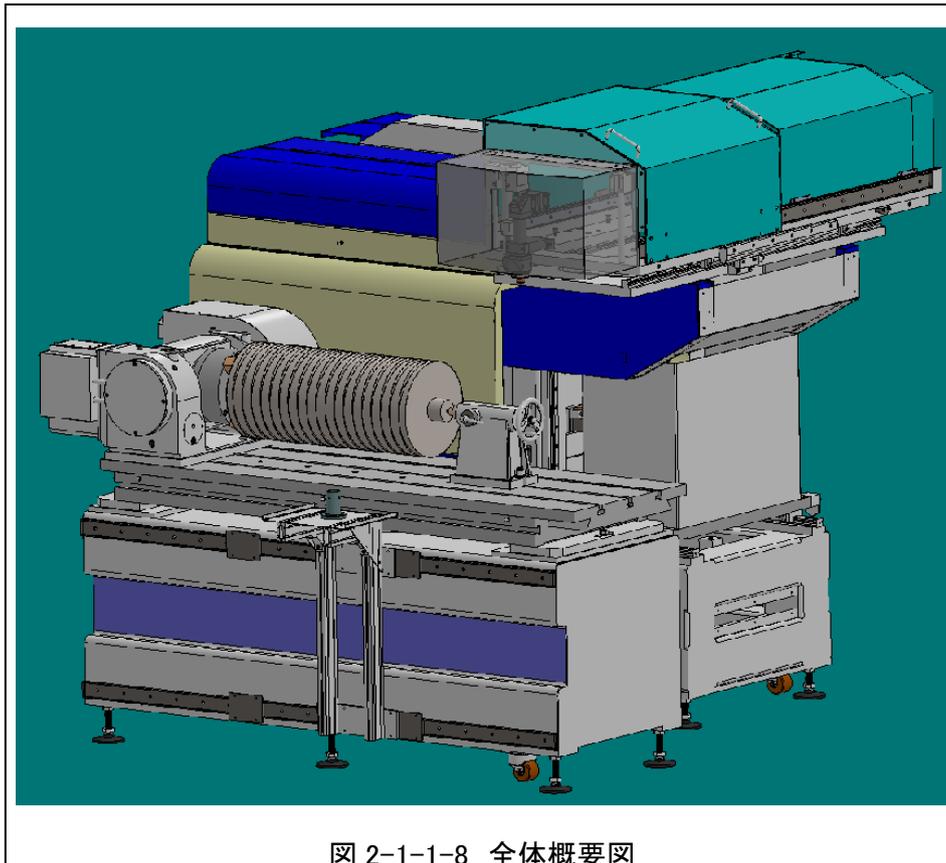


図 2-1-1-8 全体概要図

### 2-1-2 LD 励起 Nd:YAG レーザー発振器の開発について

ファイバーレーザーでは理想の形状を得られなかったため、実績のある LD 励起 Nd:YAG レーザーでの開発に切り替える事とした。固定光学系での検討を進めるために、発振器の軽量化を進めるものとした。

従来の発振器 (SL188A-Y) は SHG (波長 532nm) の LD を搭載できるようなスペースを持っているが、本研究開発では軽量化のために SHG スペースを取り払い、同時にパワーロスの低減を狙ってレイアウトの修正を行うことで軽量化に成功した。

**従来発振器 SL188A-Y 重量 160kg 本開発発振器 SL188B-Y 重量 90kg 以下**

### 2-1-3 3軸ガルバノユニットの開発について

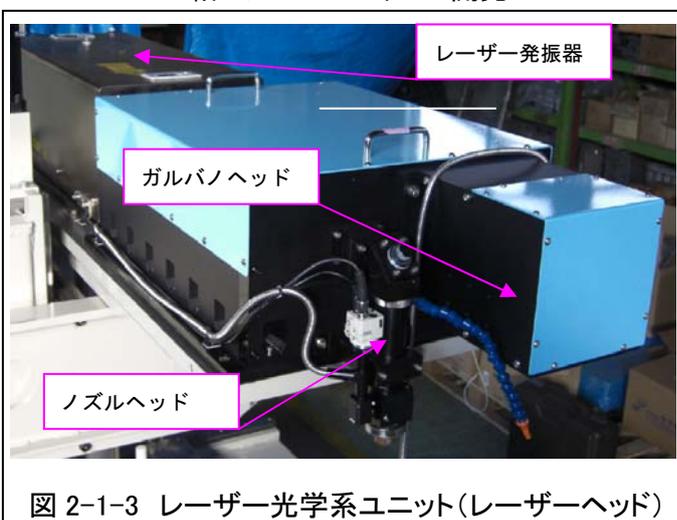
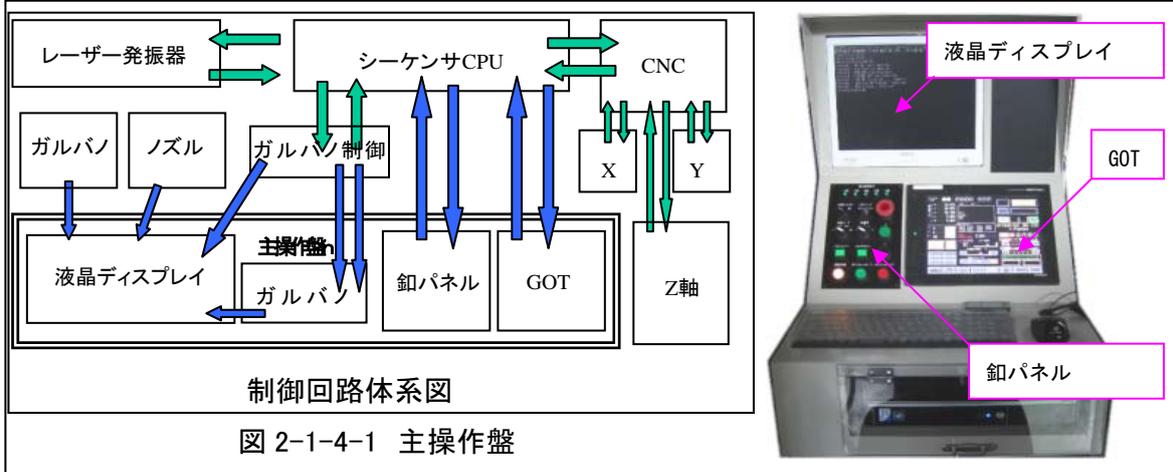


図 2-1-3 レーザー光学系ユニット(レーザーヘッド)

ガルバノユニットに関してはノズル光学系との切り替え、3 軸ガルバノ構成と 2 軸構成の載せ替えが出来るものとして開発した。レーザーヘッド構成を左記に記す。(図 2-1-3 参照)

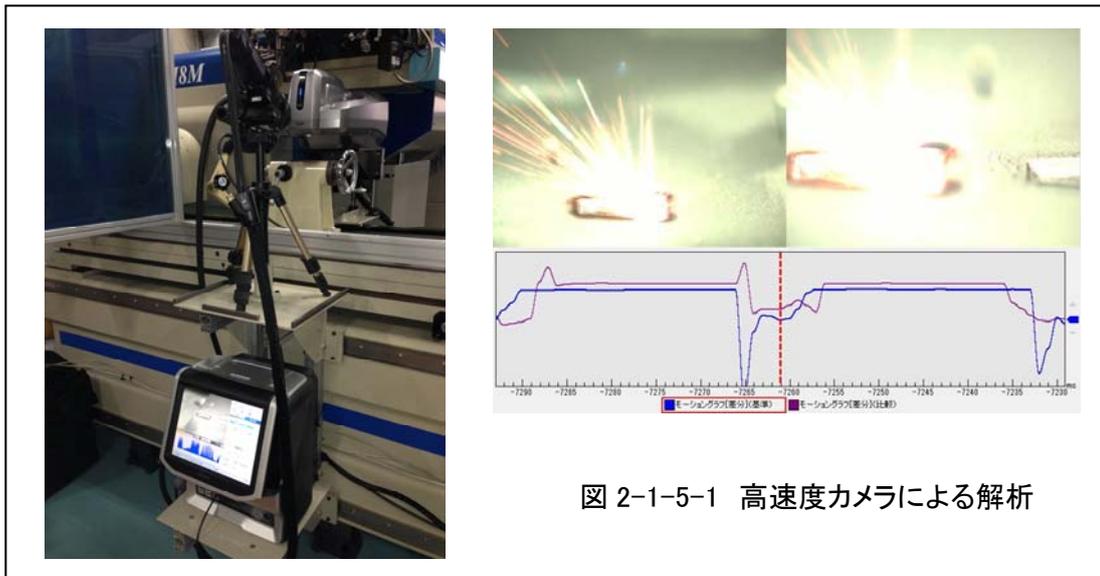
#### 2-1-4 制御回路の開発について

主操作盤の液晶ディスプレイに関しては、CCDカメラや解析機器もしくは制御PC等を選択して切り替え表示できるように開発した。CCDカメラ2系統とガルバノ制御ボードはアナログRGBとなり、制御PC等はデジタルDVIで接続。完成した主操作盤の画像を図2-1-4-1に記す。



#### 2-1-5 研究開発用途としての複合レーザー加工機改造

ガルバノ加工解析の為、高速度カメラを加工機に搭載し、加工状況モニタを可能とした。



超硬合金形彫用複合レーザー加工機を使用したレーザー加工技術の開発を進めるにあたって、本装置に検査機器を付加し、大きなワークに対しても3次元形状の測定が可能な機構を導入し、加工条件の調整のスピードを向上するための改造を実施した。

具体的には3D マイクロスコープを導入することで、ワークを外す事無くレーザー形彫された形状データを測定できるようになり、測定不可能であった大きなワークでも、本装置のワークテーブル上で検査できるようにし、アタッチメントを付け替えることで面粗さ計を取り付け、ワークの面粗さ測定や断面曲線のデータ収集を可能とするための機構を開発した。また、レーザーヘッド側には任意の位置に設置可能なサーモグラフィを取り付け、加工時のワークに対する熱影響のデータ収集を行える機構を付加した。図2-1-5-2に取り付けられた3機種の詳細を記す。図の右側にはアタッチメントを面粗さ計に取り換え後の画像を記す。

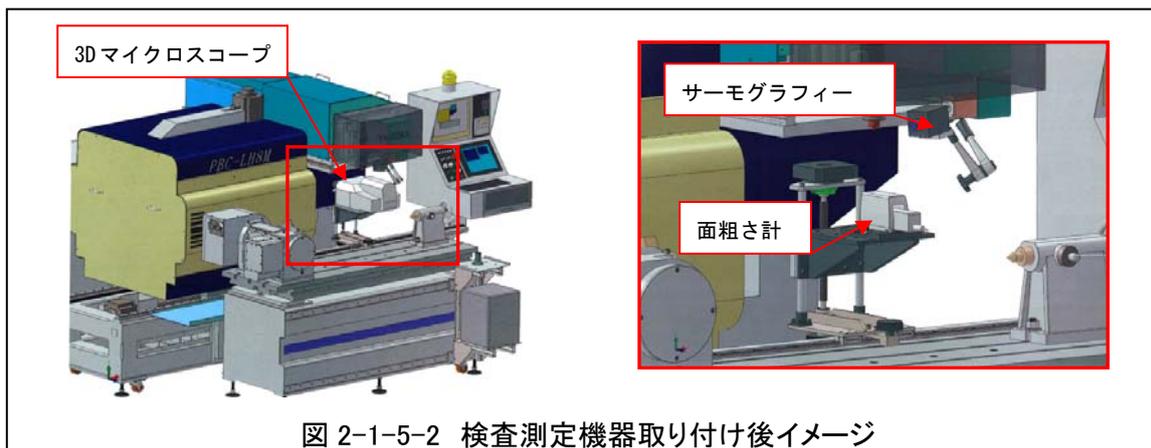


図 2-1-5-2 検査測定機器取り付け後イメージ

加工後の3次元形状を計測し、プロファイリングデータや簡易粗さデータなどを収集するため、

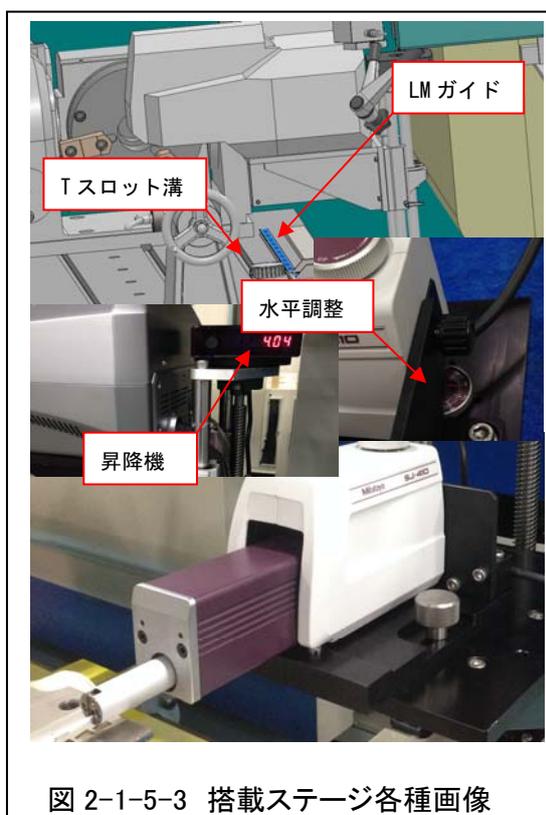


図 2-1-5-3 搭載ステージ各種画像

3D マイクロスコープを本装置のワークテーブルに搭載する設計を行った。当初は門型でのフレームを検討していたが、作業スペースの確保や傾斜円テーブルが移動することも考慮に入れて傾斜円テーブルの隙間を狙って LM ガイドを轆き、T スロット溝を利用して固定する方法とした。

また、検査書として提出する際には面粗さ計で測定されたデータが必要になるため、面粗さ計をアタッチメントの付け替えで取り付け可能な設計とした。また、面粗さ計に関しては詳細な位置調整が必要のため、水平調整するための機構と測定ポイントを調整するための機構を設けた。

高さに関してはワークごとが変わるため、昇降機構も搭載し、エンコーダによって移動量を表示する装置も搭載した。(図 2-1-5-3 参照)

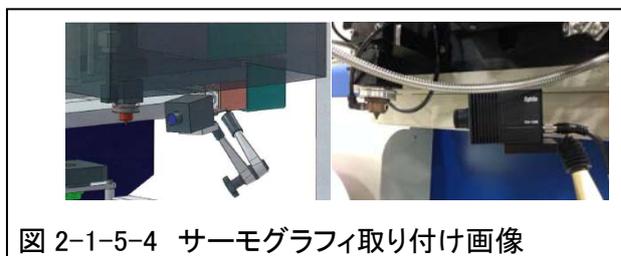


図 2-1-5-4 サーモグラフィ取り付け画像

サーモグラフィーに関しては加工近辺で撮影する可能性もあるが、場合によっては離れた位置から撮影する必要やレーザー加工の邪魔にならない様、据え付ける必要があるため、マグネットつきのフレキシブルアームにて任意の位置に取り付けられるように設計を行った。

(図 2-1-5-4 参照)

## 2-2 レーザー加工条件の開発

アドバイザーである株式会社シルバーロイより超硬合金の材質 4 種 (RG3, RSF25, RFF40, SA180) を用意していただき加工テストを実施した。

RSF25	RSFタイプ (耐蝕超微粒子合金)				RG3	RGタイプ (耐蝕性合金)			
	SFタイプの結合相を強化することによってSFタイプの優れた特性をさらに向上させた合金。また、腐蝕の原因となるO <sub>2</sub> 結合相を強化していますのでワイヤークットによる電蝕や研削後の腐蝕を防止します。					結合相強化剤を添加し、腐蝕の原因となるO <sub>2</sub> 結合相を溶解化することにより、耐熱、耐蝕性を向上させた合金。特にワイヤークットによる電蝕や研削後の腐蝕を防止します。また結合相を強化したことにより、チッピング、熱クラックの発生が減少します。			
	密度	硬度	抗折力	圧縮強度		密度	硬度	抗折力	圧縮強度
	g/cm <sup>3</sup>	HRA	MPa	MPa		g/cm <sup>3</sup>	HRA	MPa	MPa
	13.8	91	3,630	5,350		14.6	91	3,160	4,850

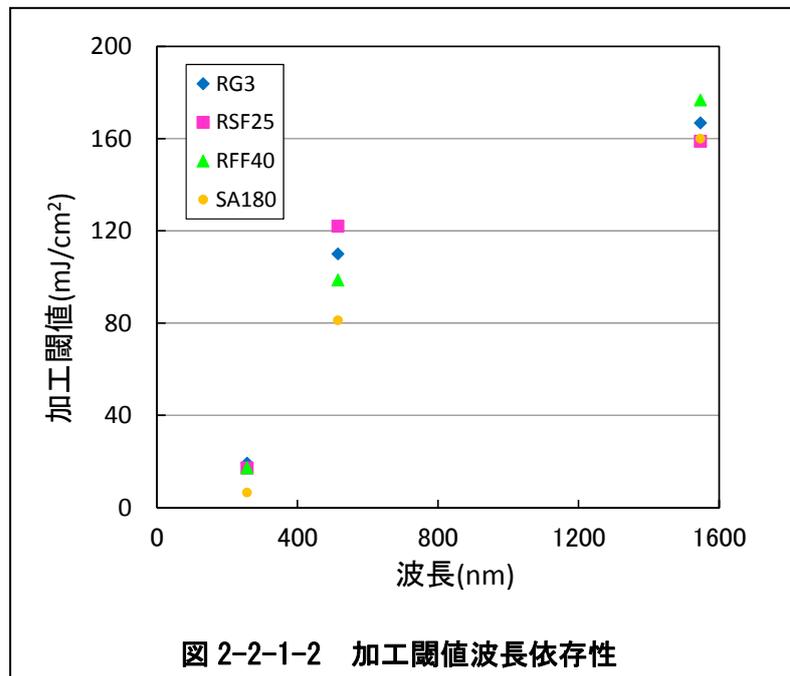
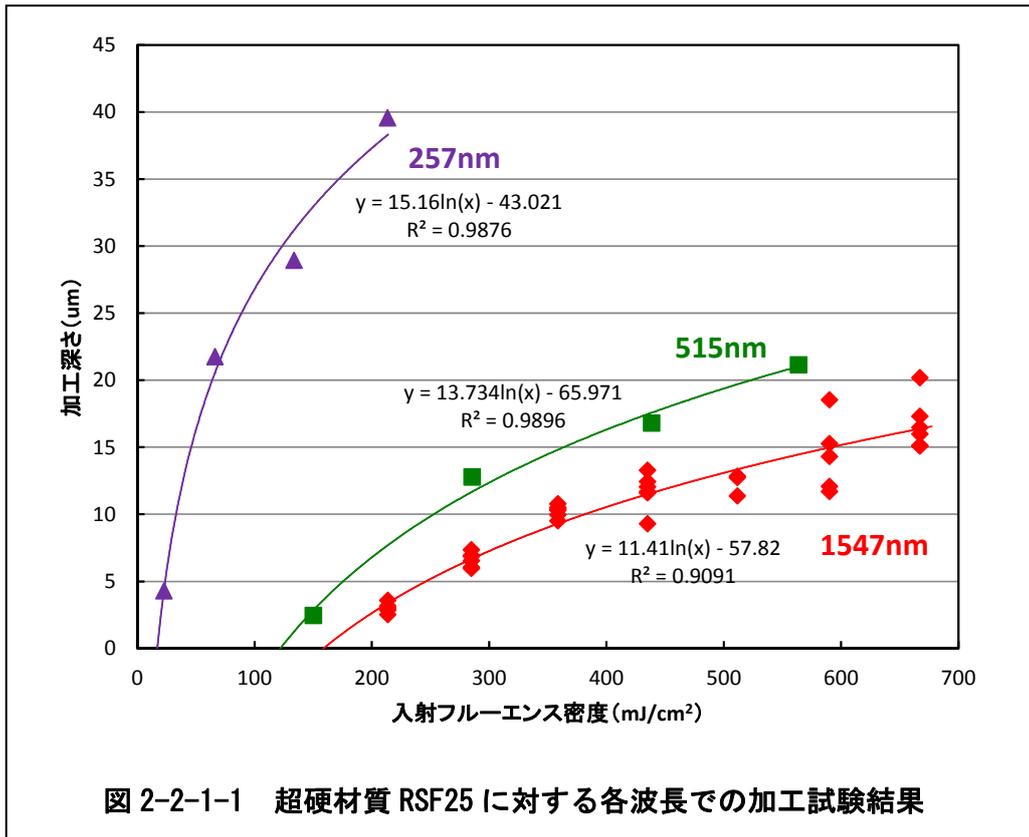
  

SA180	SAタイプ (超々微粒子合金)				RFF40	RFFタイプ (耐蝕微粒子合金)			
	超々微粒子のWOCを用いた合金です。SFタイプよりも、さらに微粒化することにより、高い抗折力と耐腐蝕性、優れた刃立ち性能を持っています。薄刃やリードフレームのプレス打ち抜き等、精密金型材料に適しています。					FFタイプの結合相を強化することによってFFタイプの優れた特性をさらに向上させた合金。また、腐蝕の原因となるO <sub>2</sub> 結合相を強化していますのでワイヤークットによる電蝕や研削後の腐蝕を防止します。			
	密度	硬度	抗折力	圧縮強度		密度	硬度	抗折力	圧縮強度
	g/cm <sup>3</sup>	HRA	MPa	MPa		g/cm <sup>3</sup>	HRA	MPa	MPa
	14.4	93	4,350	6,250		13.9	90	3,730	4,860

図 2-2 超硬材質について

### 2-2-1 超硬各材質への基礎実験

大阪大学大学院工学研究科にて、超硬材質のレーザー加工の波長依存性を調査した。エルビウムファイバ増幅器を用いたパルス赤外光源(波長 1547nm、繰り返し周波数 600kHz、パルス幅 1ns) を基本波光源とし、非線形光学結晶により短波長化した緑色光 3 倍波 (515nm)、紫外光 6 倍波 (257nm) の 3 波長を用いた。各波長のパルスを超硬材の表面に 30 秒間集光照射し、入射フルーエンス密度 (mJ/cm<sup>2</sup>) に対する加工穴の深さ (um) をレーザー顕微鏡により解析した。一例として、図 2-2-1-1 に超硬材質 RSF25 に対する結果を示す。図からも、光源を紫外領域まで短波長化すると低フルーエンス密度でより高効率な加工が実現できることが分かる。各波長の加工特性を対数近似によりフィッティングし、その近似曲線と近似式、R<sup>2</sup> 値を図内に示す。この近似により、加工閾値フルーエンス密度 (加工深さが 0um となるエネルギー) を求めた。4 種の超硬材質に対する波長依存性の結果を図 2-2-1-2 に示す。材質間による閾値に大きな差は認められなかったが、いずれの超硬材質に対しても短波長のレーザー加工は有望であることが裏付けられた。なお、515nm 緑色光に対する一部の材質についてはデータ数が少ないため、閾値については詳細な調査を必要としている。図 2-2-1-2 の波長依存性の結果を対数近似によりフィッティングした結果、近似の R<sup>2</sup> 値が 0.9995 と最も高かった RFF40 材料の近似式  $y = 85.304 \ln(x) - 450.61$  を用いて、開発光源である Nd:YAG レーザー (波長 1064nm 赤外光) の加工閾値、及びその 2 倍波 (532nm 緑色光)、3 倍波 (355nm 近紫外光)、4 倍波 (266nm 深紫外光) の加工閾値を見積もったところ、それぞれ 144, 85, 50, 26mJ/cm<sup>2</sup> となることが分かった。また、1064nm 赤外光の結果を基準とした場合、各波長の閾値低下率は 2 倍波 0.59、3 倍波 0.35、4 倍波 0.18 と求まった。



大阪大学大学院工学研究科での知見によって、超硬合金に対しても短波長のレーザーは加工実現の可能性があることが裏付けられた。ヤスオカでも同種の超硬材料でテストを実施し、ガルバノスキャニング、ハッチングパターン、ガルバノスキャン速度、レーザーON/OFF タイミング、レーザーパワー、焦点位置の条件だしを行った結果、超硬合金へのガルバノ Z 軸機構を使用した加工を実現することが出来た。

以上の結果から 5mm 角のレーザー形彫加工の条件を調整し、加工実現することが出来た。(図 2-2-1-3) 今後はコーナー部分の加工をさらに向上させ、タクトタイムの短縮も視野に入れながら、今後の研究開発を行っていくものとする。

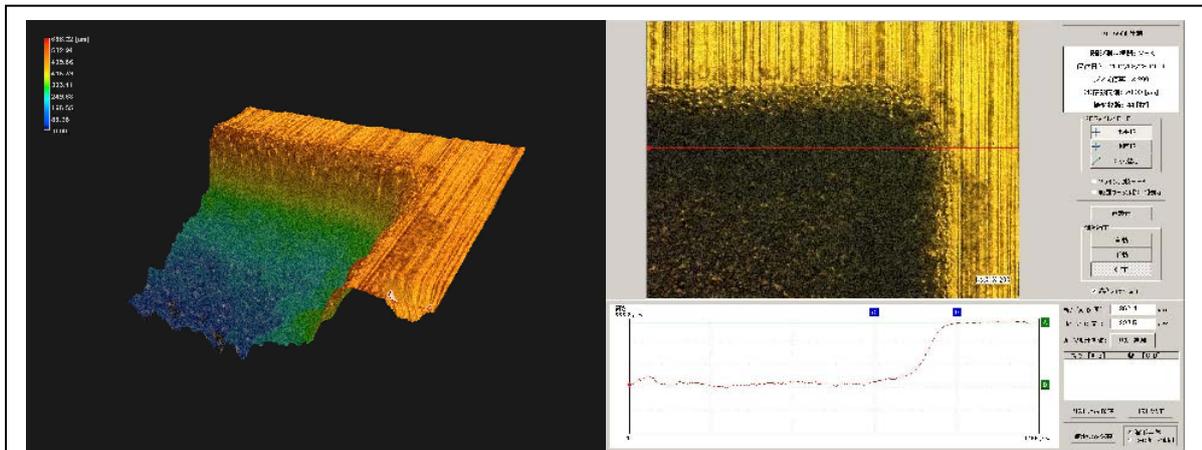


図 2-2-1-3 超合金 (RFF40) への 5mm 角深彫レーザー加工

## 2-2-2 光学系の調整

昨年度の研究開発でレーザー形彫加工を実現することはできたが、ヤスオカで従来から開発してきた  $F=100\text{mm}$  のフォーカスより長い  $F=300\text{mm}$  の長焦点のタイプであったので、エネルギー密度が低く、加工条件の調整に制限ができてしまうという問題があった。

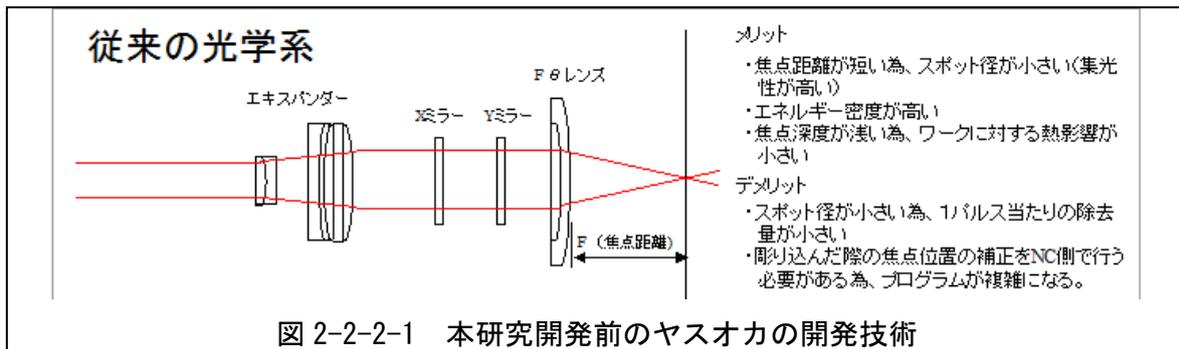


図 2-2-2-1 本研究開発前のヤスオカの開発技術

本年度の研究開発では従来より調整範囲の広いビームエキスパンダーを使用することで入射ビームを拡げ、加工焦点でのエネルギー密度を高めることを目的とした。

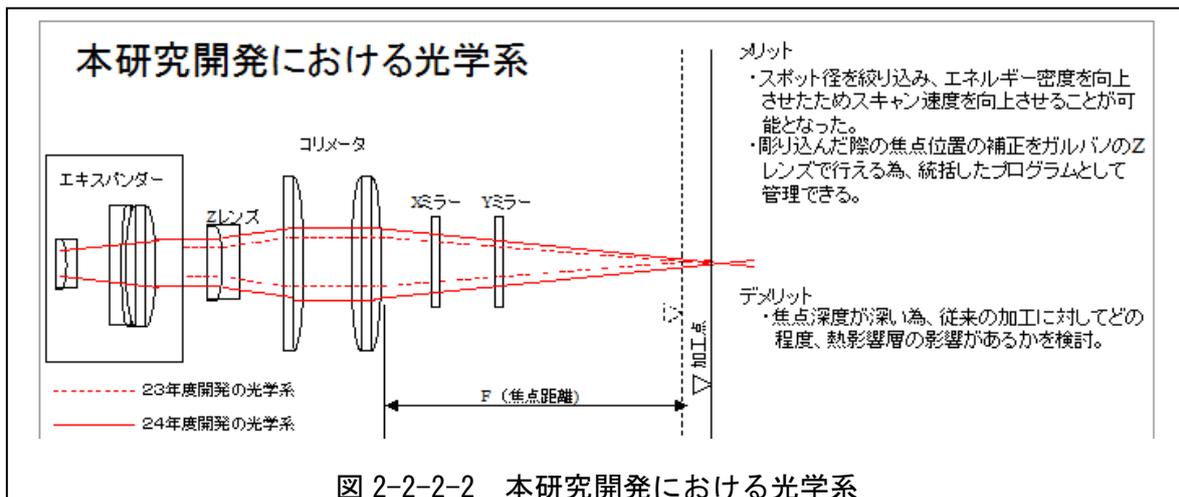


図 2-2-2-2 本研究開発における光学系

大阪大学の知見で超硬材に対してのレーザー加工閾値が絞られてきたので 3 軸ガルバノユニットに設置したビームプロファイラでガルバノヘッド及びビノズルヘッドそれぞれの入射ビーム径を調整した。(図 2-2-2-3)

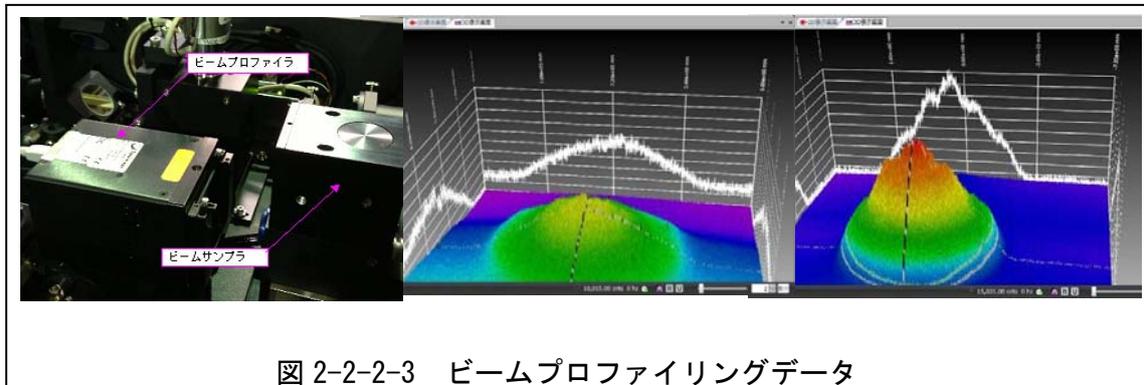


図 2-2-2-3 ビームプロファイリングデータ

調整されたレーザーにて加工条件を調整し加工テストを実施したところ、現状では 5mm角の試料の加工時間883秒に対して新規開発機械での加工時間は460秒となり、30%以上の加工時間削減で5mm角のエリアの形彫を実現することが可能となった。

### 2-2-3 ダイス鋼へのレーザー形彫加工条件の開発

本加工装置での加工の引き合いの中で圧延ロールへの形彫加工の引き合いがあった。ダイス鋼への加工を実施しユーザーにて現状取り扱っている放電加工での圧延ロールと比較するところからスタートしたい旨の要望があった。ダイス鋼と超硬合金では材料特性が全く異なるため加工条件も変わってくるが、本研究開発において検査解析機器を導入した事で、ダイス鋼の加工条件でも改善がみられた。具体的にはガルバノスキャニング機構を使用した光学系ではQスイッチの調整がポイントとなってくるが、これまではQスイッチのPWM周波数Duty90%でほとんどの加工も実施してきた。しかし、今回3Dマイクロスコープを導入して3次元形状の解析が早められた事により、Qスイッチ加工条件の違いによる底面形状の状態が非常にわかりやすくなり、これまでのデューティ90%での加工より、10%に落とした方がより品質の良い加工が出来る事が確認された。下記にデューティ90%で加工された形状とデューティ10%で加工された形状を示す。

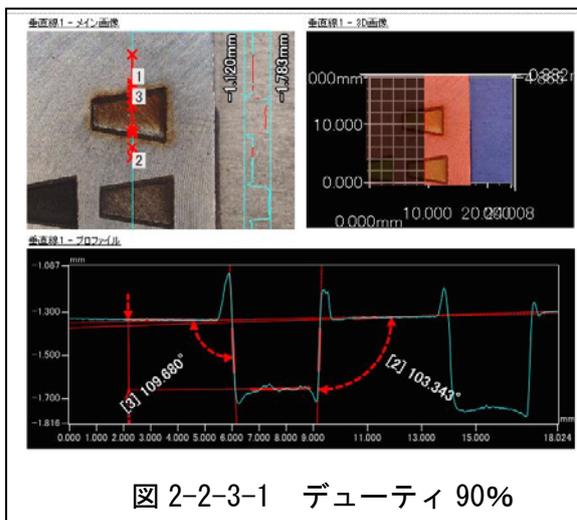


図 2-2-3-1 デューティ 90%

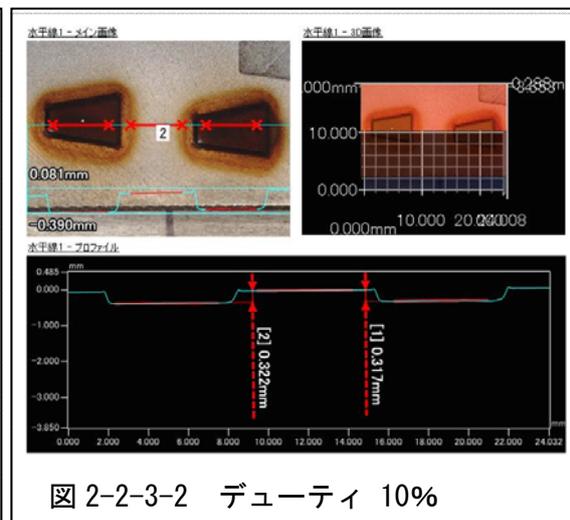


図 2-2-3-2 デューティ 10%

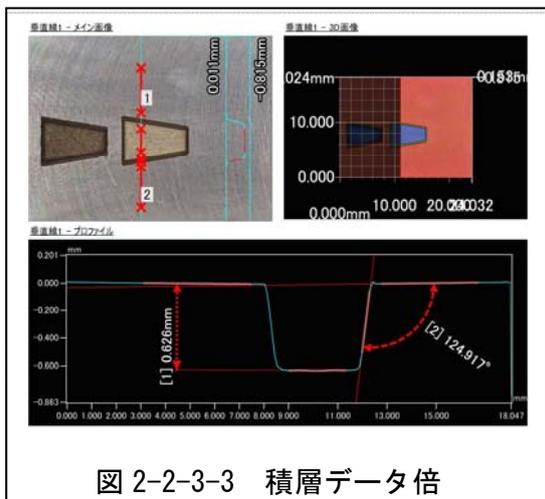


図 2-2-3-3 積層データ倍

上記画像を見ればデューティ 10%の方が高品質な加工を実現している事がわかるが、デメリットもある。それは全体のエネルギー量としては従来のデューティ 90%よりダウンしているため、深さを大きく彫り込む事が出来ない点である。その為に積層データを倍に増やし更に詳細な加工条件調整をした結果が左記の図 2-2-3-3 である。(真鍮ブラシにて表面の堆積物は掃除している)

## 2-3 コーナー部分の加工精度向上のためのレーザー入射角の調整

### 2-3-1 ガルバノ照射角度の調査

コーナー部分の加工形状改善のために、ガルバノ光学系のレーザー入射角の調整を行う

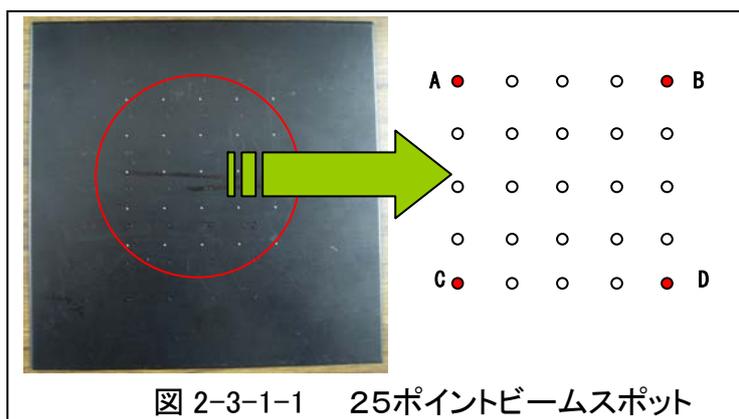


図 2-3-1-1 25ポイントビームスポット

事が必須である。本研究開発ではレーザー入射角に対するビームスポット形状の関係を明確にし、ガルバノ加工エリアに対してのレーザー入射角を調査した。図 2-3-1-1 は加工エリアを 25 ポイントに分割してビームスポットを照射したサンプルである。

図 2-3-1-1 に示した4点の赤丸部(A~D)のビームスポット形状を調査し、レーザー入射角の確認を行った。形状データを取った限りでは入射角度はそれほど大きくはなく、ガルバノ

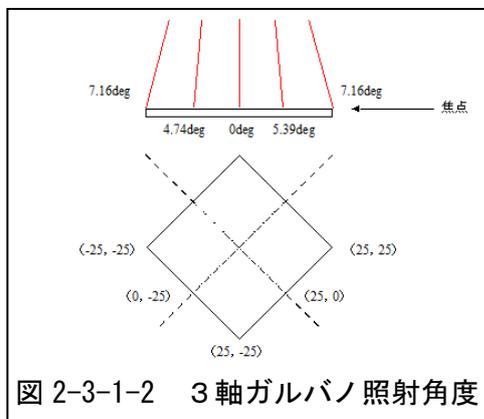
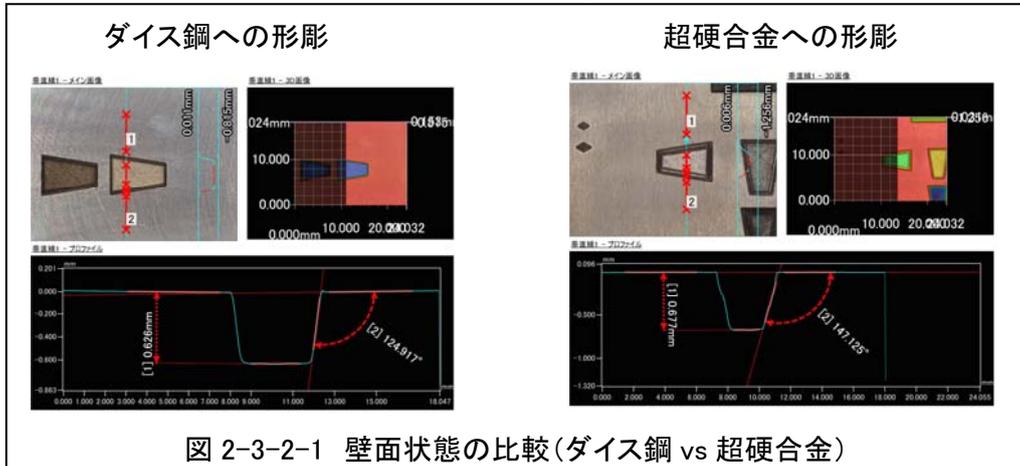


図 2-3-1-2 3軸ガルバノ照射角度

の設計を確認した所、ガルバノ光学系での焦点位置可変は、長焦点に向かうほど入射角度は小さくなるという事であった。(図 2-3-1-2 参照) 今後の研究開発においてはガルバノ光学軸での入射角は大きくとれないものとして、コーナー部分の加工精度向上に関する加工条件調整はガルバノスキャン速度と Q スイッチ周波数から条件を絞り込むものとした。

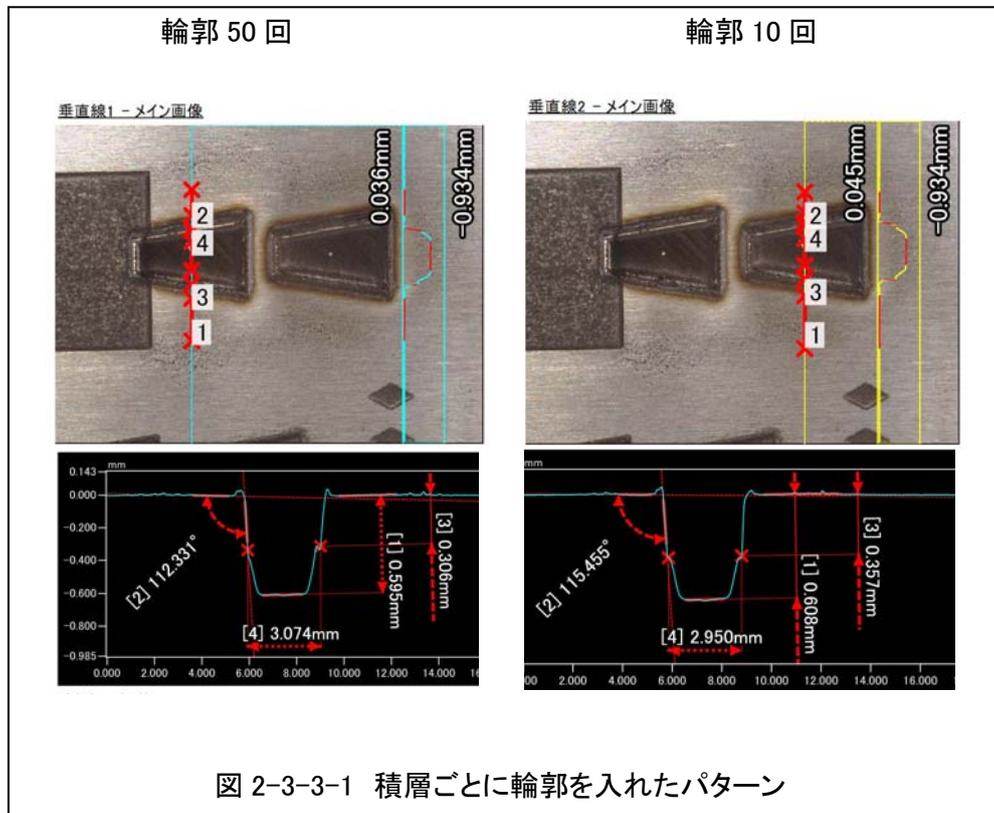
### 2-3-2 壁面バリを除去する為のガルバノスキャンニング検討

ダイス鋼に対しては壁面の加工条件は大きく改善された。これは従来固定で条件だしを行っていたPWM周波数Dutyを再調整し、加工条件を出し直したことが功を奏したが、超硬合金に関しては残念ながらPWM周波数Duty10%で設定するとパワー(加工閾値)が足りないようである。本研究開発においてはPWM周波数Dutyを90%として加工条件を出した。

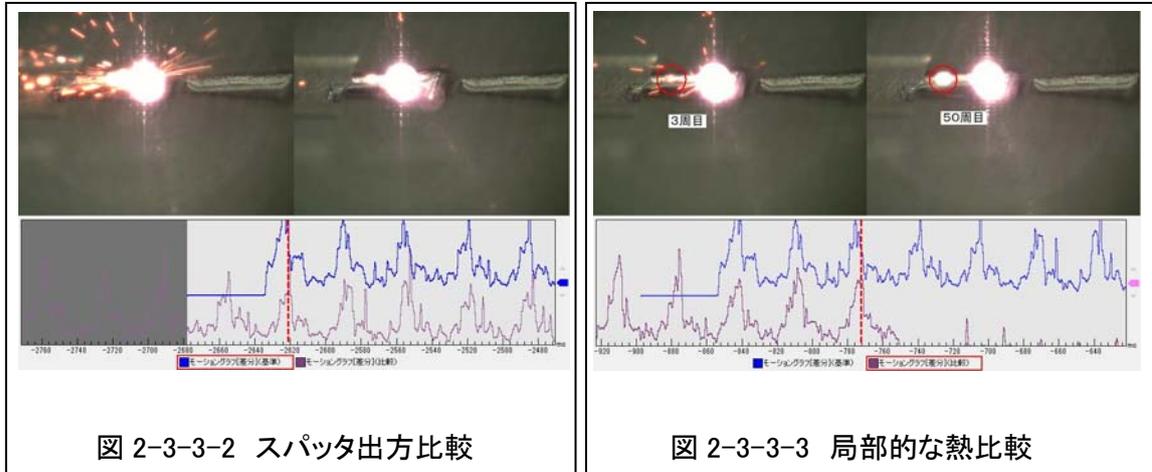


### 2-3-3 超硬合金形彫時のバリ軽減のための輪郭加工テスト

超硬の加工でも積層データとしてはダイス鋼のパターンと同じであるので、底面が狭く(面積が小さく)なってしまうのは、加工後に発生していたバリの影響が考えられる。そこで積層ごとに輪郭をレーザー加工する条件を作り、輪郭を積層ごとに50回加工するパターンと10回加工するパターンのデータを作成しテストを行った。(下記図 2-3-3-1 参照)



輪郭を回して積層ごとのバリを除去できないかと考えたが、高速度カメラにて検証した結果、輪郭を5回程回したあたりからスパッタの出方が少なくなっていた。(下記図 2-3-3-2 参照)また輪郭50回のデータで確認されたが、3回目あたりから壁面に熱量がかかり、それが50回目までかかり続けているという状態も確認された。(下記図 2-3-3-3 参照)



超硬合金形彫の加工条件調整に関して、Q スイッチ周波数に対しては前述の 2-2-4 ダイス鋼へのレーザー形彫加工条件の開発でも記載したように PWM 周波数デューティがポイントになってくるようであるので、今後の条件だしはガルバノスキャン速度を基準、もしくは Q スイッチ周波数を基準として、PWM 周波数デューティを調整するものとした。

## 2-4 プログラミング・ソフトの導入及び改良

### 2-4-1 レーザー制御用プログラムの作成

ガルバノプログラミングファイルの選択を CNC 装置から制御するソフトやレーザ変位センサ、照明装置の外部制御などを追加した為、制御回路を改造した。下記図 2-1-4-2 にタッチパネル (GOT) の修正を記載する。また、ガルバノ加工時間の表示やレーザー発振器からの平均パワーのフィードバック表示、エラーメッセージの表示などを追加している。

S160M14 ; → レーザー出力電流値設定

T1 ; → script ファイル選択

M10 ; → script ファイル登録

M20 ; → script ファイル加工実行

B1 ; → rconfig ファイル選択

M11 ; → rconfig ファイル登録

G1 ; → レーザー加工実行&座標軸駆動

上記のコードを位置決め動作などと組み合わせることで様々な形状加工を実現する。

図 2-4-4-2 制御回路変更に伴うタッチパネル(GOT)の修正

## 2-4-2 インターロックの追加

本加工装置開発の具体的な案件として、アニロックスロールのサンプル製作を進めていたのだが、本加工の際にトラブルが発生し、開発に遅延が出ることとなった。原因としてはレーザー



図 2-1-4-3 各種センサー機器

発振器の2次側チラーが落ちていた為の単純なミスであるが、このようなミスを避けるためにも安全監視システムの導入を進めた。具体的にはレーザー用チラーの冷却水温度と流量を監視するシステムやアシストガスの流量を監視するための機器を導入した。

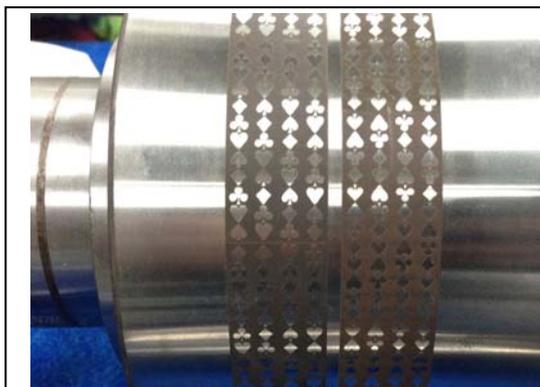
また、傾斜円テーブルを使用する場合にチャックしたロールを駆動させるとロール及びテーブルを壊してしまう可能性があるため、傾斜軸のインターロックを追加し、安全面を向上させた。



図 2-1-4-4 NC 傾斜円テーブル追加タッチパネル画面

## 2-4-3 加工プログラムの作成

プログラミング・ソフトの導入及び改良については、具体的な案件としてあがってきたアニロックスロールの開発に際して、ノズル光学系を使用して、10000mm/min でレーザー加工を行うため、加工テーブルの再調整とプログラミングソフトを修正した。また、テスト加工といえども、サ



画像 2-4 同期加工したサンプルロール

ンプル用の高価なロールを支給していただいているので、レーザーの監視とアシストガスの消費量などもセンサによって確認できるようにし、アニロックスロールの加工に関しての信頼性を向上した。また、展示会での出展に際し、ガルバノスキャニングとワークテーブルの回転を同期して加工できるプログラムを作成し、展示会でのデモを実施することができた。(図 2-4 参照)

## 2-5 試作品のフィードバック評価、放電加工との取合の最適化

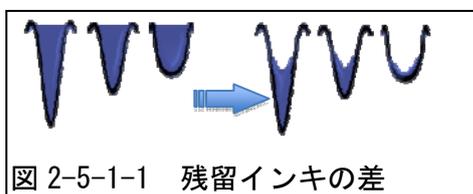
### 2-5-1 レーザー複合加工による超硬合金ロールの試作加工

#### 2-5-1-1 超硬合金製アニロックスロールの開発

本研究開発において、ユーザーからの具体的な案件として超硬合金製アニロックスロールの開発依頼があった。フレキシ印刷技術においてアニロックスロールと呼ばれるロールの技術革新は印刷品質の上位化と安定性に大きく貢献しているが、現状では表面をセラミックコーティングされたロールの加工機しかなく、超硬合金製のアニロックスロールを加工する為の装置は存在しなかった。超硬合金製のアニロックスロールが必要になってきた背景としては、アニロックスロールの技術を応用して、近年では印刷だけでなく液晶や太陽電池その他電子部品分野などでも薄膜コーティング技術として使用されるようになってきており、既存のセラミック被膜のアニロックスロールでは使用する液体によっては短期間で摩耗してしまうものもある為、耐久性に課題を抱えているのが現状である。そこで、被膜をセラミックから超硬に変えた時の耐摩耗性を向上を期待して本研究開発を進めるものとした。

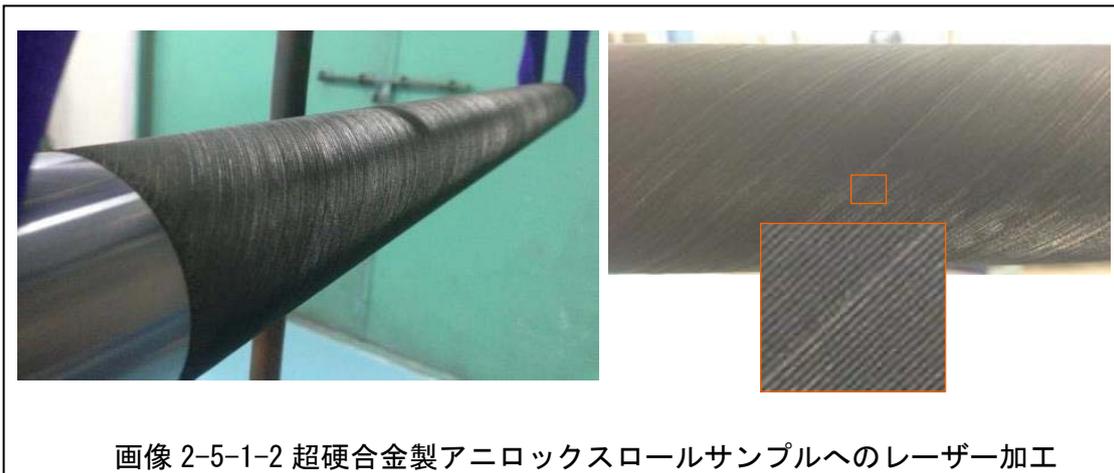
#### 2-5-1-2 超硬溶射皮膜に対するレーザー加工条件開発

アニロックスロール開発に当たって、溝の断面形状（容積）がポイントとなる。下記図 2-5-1-1 に示したのが3種の異なるセル断面形状において転移後の残インキ量の差を示したものである。残留インキは経時的に目詰まりやインキ保持量の低下を誘発するので、適宜洗浄でこれを回避する必要が発生する。アニロックスの性能低下を防ぐ意味でも、より半球状に近いセル形状を作るような加工条件を検討した。



超硬の溶射材が入るまでの基礎テストとして、超硬合金 RT56 の材質でレーザー加工条件を調整し、同条件にて RSF05 への加工を実施した。結果としては超微粒の RSF05 の底面が荒れたような状態になったが、これまでの経験から、RSF05 が超微粒の傾向があるので、タングステンの粒度が問題かと考えていた。しかしアドバイザーである株式会社シルバーロイの知見によると、上記2種の材質の違いとしては、タングステンを結びつける結合材の割合が大きく違うとの事なので、超硬合金へのレーザー加工条件としてはタングステンの粒度と結合材がポイントになるという事が見えてきた。

サンプルワークは WC-20CrC-7Ni また、RT56 に関しても、底面の状態が不均一であるため、これも出来る限り均一な状態を作り出す加工条件が必要と思われる。超硬溶射皮膜テストワークで加工条件を調整した結果、形状としては問題ないレベルまで来たのでユーザー評価用のテストワークに加工を実施した。（下記画像 2-5-1-2 参照）



画像 2-5-1-2 超硬合金製アニロックロールサンプルへのレーザー加工

上記画像の右側赤枠内の溝が最期のラップする溝であるが、この溝が後行程であるポリシング後も潰れた形で残るといった問題が発生した。この問題は本加工装置の回転軸の累積誤差が原因と考え、回転軸の調整を再度実施しテストロールにて累積の位置決め誤差を確認した。本ワークよりは移動量が小さいものの、ラップ位置での形状の崩れは見受けられなかったため、加工を実施。ただし新たな問題として、加工途中にレーザー発振器がダウンするという問題が発生した為、再度ロールを手配して、加工装置の方も流量計など各種センサを設置し、加工途中でレーザーがダウンする問題を未然に防ぐようなシーケンスの改造を実施した結果、ラップ位置精度の改善したユーザー評価用超硬合金製アニロックロールサンプルを製作できた。(下記図 2-5-1-3&画像 2-5-1-4 参照)

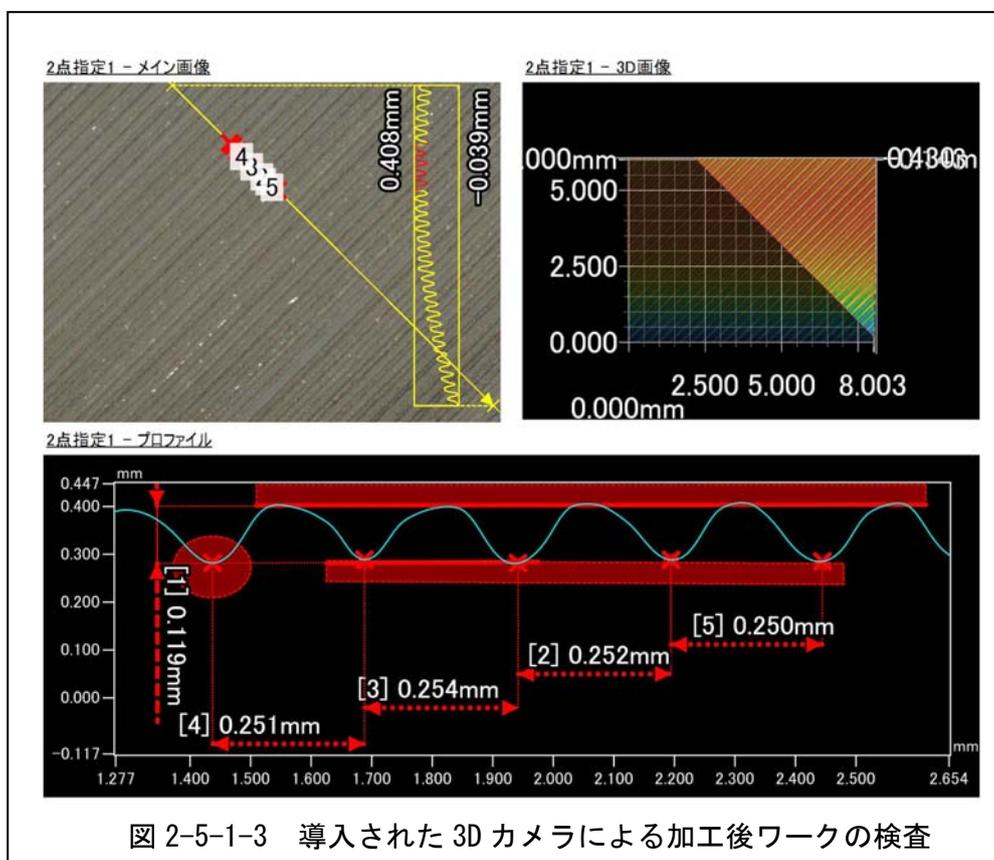


図 2-5-1-3 導入された 3D カメラによる加工後ワークの検査



画像 2-5-1-4 レーザー加工終了後

また、本加工の際にサーモグラフィーを使用し、加工時の熱影響の解析を行っていた、長時間の加工であったため、周囲温度が代わってしまっているが、ロール自身への熱影響は加工部への局部的なものである事が実証された。(下記図 2-5-1-5 参照)

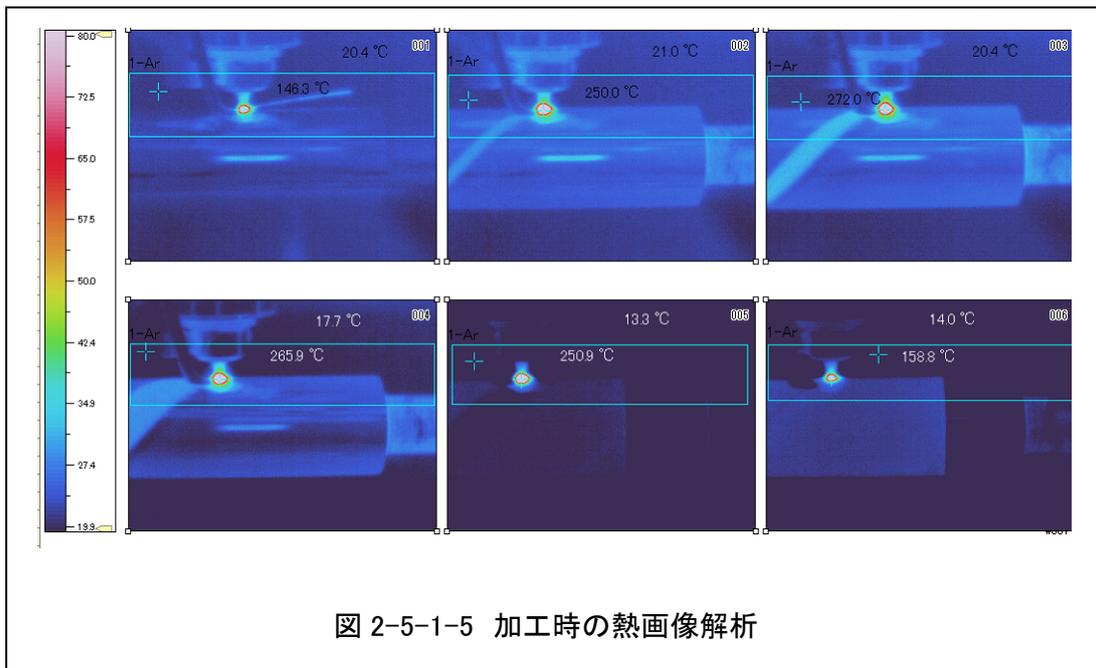


図 2-5-1-5 加工時の熱画像解析

## 2-5-2 ユーザー評価

本成果報告書を記載している現在、前項にて記述された案件(下記項目1 & 2)にプラスして数件の具体的な案件のテスト加工を取り扱っている。

### 1. 大阪府の圧延加工品の製造販売をする企業

ターゲット: ダイス鋼製圧延加工用形彫ロールサンプル

目的: 現状使用している放電加工による圧延加工用形彫ロールとの比較と評価

### 2. 静岡県の溶射加工とセラミックアニロックスロールの販売を手掛ける企業

ターゲット: 超合金製アニロックスロール

目的: 電子部品などの製造ラインで使用されるセラミックアニロックスロールより耐久性向上

### 3. 大阪府の塑性加工で使用される機能的オイルの製造販売を手掛ける企業

ターゲット: 製罐で使用される金型の超硬化

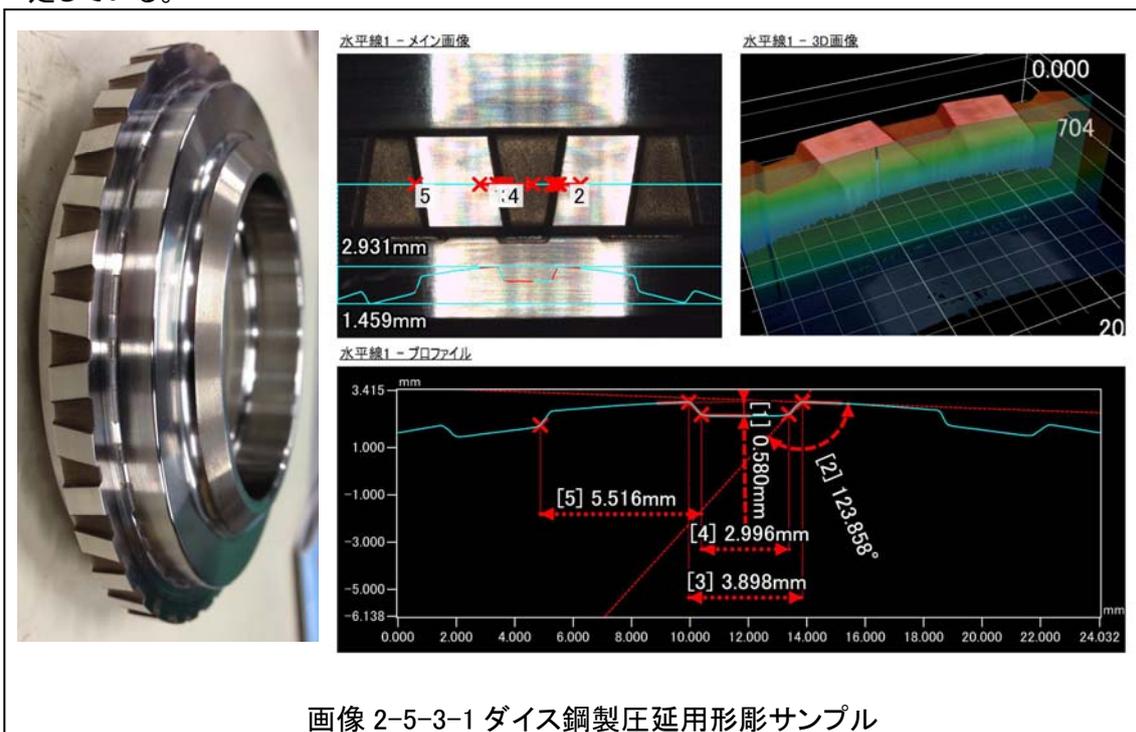
目的: ダイス鋼から超硬に変わる事で、離型性向上の為の溝加工を従来のダイス鋼から超への加工条件検討

### 4. 東京の宝石などを加工(ダイヤモンド、サファイヤ、ルビー、超合金)している企業

ターゲット: 詳細はまだ伝えられていないが、まずは超硬に四角錐を加工し、その出来映えを評価していただく予定。

## 2-5-3 フィードバック評価

上記で記載したダイス鋼製圧延加工用形彫ロールは今後、ロール取り替えの際に本研究開発で製作されたロールでの圧延加工評価していただく予定をしている。(下記画像 2-5-3-1 参照)、また、超合金製アニロックスロールに関しては、客先にてポリシング加工での仕上げを予定しており、ポリシング加工後の検査で問題なければ、製造ラインに搭載して加工評価を予定している。



画像 2-5-3-1 ダイス鋼製圧延用形彫サンプル

#### 2-5-4 放電加工等の加工方法との取り合いの検討

本研究開発テーマであるレーザー形彫と放電加工の比較に関して、現在進めている案件に関しては、超合金製アニロックスロールの製作は放電加工では難しいかと思われる。ダイス鋼製圧延加工用形彫ロールに関しては、現状では放電加工されたロールを使用されているので、ユーザー殿の評価とフィードバックを進めていく予定である。現状では、レーザー加工のメリットは放電加工のように電極を作成する必要がなく、加工データの修正だけで形状の修正が可能な点であるが、デメリットとして見えてきたのが、光という非接触のツールである為に、加工エリア外への影響が懸念される。下記にダイス鋼製圧延加工用形彫ロールの加工時の熱画像解析(下記図2-5-4-1参照)を添付するが、加工エリア外の部分に熱(80°C程)がかかっており、この熱影響が圧延加工の際に悪影響を及ぼさないかどうかの検証も実施していただく予定である。

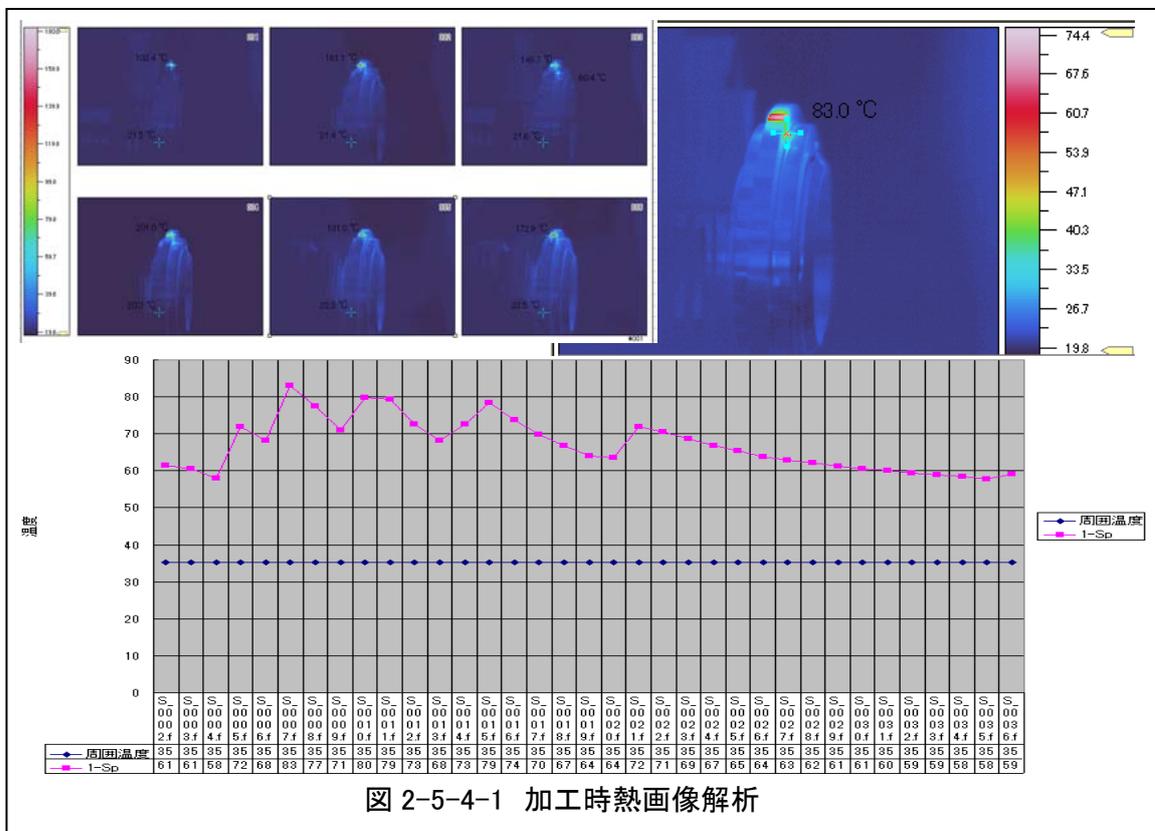


図 2-5-4-1 加工時熱画像解析

### 第3章 全体総括

株式会社ヤスオカ(以下ヤスオカ)ではこれまでランプ励起の Nd:YAG レーザー発振器や LD 励起の Nd:YAG レーザー発振器を用いて様々な形彫り加工を行ってきた。しかしレーザー発振器を機械に固定された装置構成では加工対象(以降ワークと呼ぶ)を移動させる必要がある為、汎用性に欠ける面があった。そこで、レーザーヘッドを駆動させる為のレーザー発振器の開発と装置構成の開発を行う事からスタートした。

本加工装置の開発を進めるうえで、ヤスオカが従来から保有していた技術(F $\theta$ レンズを使用した2軸ガルバノミラーでの形彫り加工)から発展させた光学系システム(レーザーの焦点距離をレンズ光学系で制御)の開発も目玉の一つとし、超硬合金に対し、ガルバノZ軸機構を使用した深彫り加工を実現することが出来た。

また、長尺物からリング形状の円筒ワークまで搭載できる傾斜円テーブル(2軸駆動)を備えたワークテーブルの開発と、5軸(同時4軸)までの多軸制御を実現できる NC 制御装置として開発された。

本加工機の特徴として、5軸すべての位置決めをフルクローズドループで制御された信頼性のある CNC レーザー形彫加工装置であるとともに、研究開発用として、検査機器(3D マイクロスコープ、面粗さ計)や解析装置(ハイスピードカメラ、サーモグラフィー)を搭載している点も大きな特徴である。

本加工機(型式 PBC-LH8M)の特徴を以下にまとめる。

1. LD 励起の Nd:YAG レーザー発振器を搭載している
2. レーザーヘッドが3軸駆動する移動光学系のマシンである
3. ガルバノ光学系とノズル光学系を光軸切り替えで容易に選択可能である。
4. 3軸のガルバノ光学系により積層データ込みでガルバノプログラムを組む事が出来る。
5. 円筒ワークへの加工を前提にワークテーブルが設計されており、円筒ワークに対してのレーザーヘッド平行だし機構と芯押し台を兼ね備えている。
6. 機械側5軸に加え、ガルバノ3軸もフルクローズドループ制御されており、信頼性の高い位置決め機構を有している。
7. 大きな円筒ワークでも機械に搭載したまま形状測定可能な3D マイクロスコープを搭載している。
8. 高速なガルバノスキャンを捉えるハイスピードカメラを搭載している。

レーザー加工条件に関しては、基礎実験として大阪大学大学院工学研究科によって超硬合金に対しても短波長のレーザーは加工実現の可能性があることが裏付けられた。また弊社の経験上、超硬の WC 粒径が小さいほど加工時間が掛かるが面粗さは良い方向に向かうと考えられていたが、大阪大学大学院工学研究科によって WC 粒径が小さく、Co 含有量が少ない材料は 50MJ/Cm<sup>2</sup> 以下では穴加工ではなく表面層が溶解する事が判明した。ヤスオカでも同種の超硬材料でノズル加工でテストした際には同様の現象があったため、

WC の粒径に加工条件が左右されるのではなく、WC の結合剤である Co の含有量も加工条件に大きく左右する事が判明した。

また、検査機器と解析装置の導入により加工条件出しのスピードが上がり、従来は固定で条件を出していた Q スイッチの PWM 周波数デューティに関してもレーザー加工の大きなファクターとなる事が確認された。

また、2013 年に開催された Photonics2014 で本装置を出展したことで、本加工装置を広く認知していただくことが出来、具体的なテストサンプル作成の依頼を受けることが出来た。ノズル光学系を使用して超合金製のアニロックスロールの評価用ロールを製作できたことも本研究開発の事業化に向けて大きく前進できた。また、ガルバノ光学系を使用して作成した圧延ロールに関してはすでに放電加工でもユーザーにて製作している実績があり、放電加工との比較をユーザー殿に評価していただき、レーザー加工のメリットを生かしたサンプルの作成を手がけて行くものとする。

本加工装置の開発にて、従来機種より高速、高精度、広範囲の加工を実現する事が出来た。加工条件の開発を進める事で、ガルバノスキヤニングに対しての PWM 周波数とスキャン条件の最適化を推し進める事で、材料に適した加工を早く高精度に行うことが出来た。また、ノズル加工により、ガルバノでは出来ない微細な溝形状や薄板の切断加工も可能となった。

本年度の研究開発で様々な分野で本研究開発のレーザー形彫が適用できる可能性を秘めている事が見えてきたが、まだ実際のラインで評価されたものはなく、今後様々な要求に答えていく必要が出てくるかと思われる。本加工装置は 2 つのレーザー光学系（ノズル光学系とガルバノ光学系）を持ち合わせており、かつ 5 軸のテーブルを持ち合わせている。今後、本加工装置の能力を最大限活かして、ユーザーからの要望に柔軟な対応をして開発を進めていくものとする