

平成 2 2 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「低振動化・温度自律補正機能を有した、超精密加工機械の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成 2 3 年 9 月

委託者 中部経済産業局

委託先 財団法人岐阜県産業経済振興センター

目 次	ページ
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（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	5
1-3 成果概要	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	10
第 2 章 本論	11
2-1 超精密加工機への対応	11
2-1-1 高精度位置決め機能の検討	11
2-1-1-1 油圧振動の低減機構開発	11
2-1-1-1-1 静圧実験装置を用いた振動の変位測定	11
2-1-1-1-2 モデル流路を用いた可視化観察	11
2-1-1-2 温度自律補正機能の開発	11
2-1-1-2-1 温度自律補正機能の概要と目的	11
2-1-1-2-2 現状の温調回路	12
2-1-1-2-3 構想中の自律温調補正回路	13
2-1-1-2-4 シミュレーション解析を利用した温調装置用熱交換器の設計	13
2-1-1-3 加工主軸の開発	18
2-1-2 レーザー加工ユニットの開発	19
2-1-2-1 レーザー加工ユニットの概要と目的	19
2-1-2-2 開発したレーザー加工ユニットについて	19
2-2 加工技術への対応	20
2-2-1 加工技術の開発	20
2-2-2 微細加工の検証及び評価	24
2-2-2-1 各種デバイス製作のための加工実験	24
2-2-2-2 照射雰囲気制御下でのグラッシーカーボン(GC)へのレーザー加工	30
第 3 章 全体総括	33

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

自動車・電機・電子産業等のものづくり分野において、精密加工技術の高度化が製品の品質、機能向上を可能にすることから、任意の形状及び粗さを高速、高精度で加工・付与する超精密加工機械へのニーズが高まっている。加えて、今般の高水準の円高による厳しい事業環境を背景として、国際競争力を高める観点から、川下事業者の超精密切削加工に対するニーズは、コスト低減のため一層の高速加工を求めるようになってきた。

そこで、本研究開発では、高速加工、高品質加工を妨げる振動及び熱変形などを自律制御する超精密切削加工機を開発し、さらに自由曲面上にサブミクロンオーダーの微細形状創成を可能とするレーザー加工機能を組み合わせ、自由曲面上の形状精度 $1.5\mu\text{m}$ 以下、そこに作る微細形状加工精度 $0.5\mu\text{m}$ 以下の加工が可能となる次世代型の超精密加工機械を開発することを目的とする。

具体的な技術的目標値と実施内容は表 1.1、1.2 のとおりである。

表 1.1 技術的目標値

区分	現状	委託期間中の目標値	目標値
機械位置決め精度	$1\mu\text{m}$	$0.5\mu\text{m}$	$0.5\mu\text{m}$
機械振動	200nm	200nm	10nm
工具軸再現性	$0.2\mu\text{m}$	$0.2\mu\text{m}$	50nm
加工形状精度	$2\mu\text{m}$	$1.5\mu\text{m}$	$1.5\mu\text{m}$
加工表面粗さ	10S	10S	$0.2S$
ワーク加工時間	(100 時間)	(10 時間)	(10 時間)
加工コスト	(1,000 千円)	(1,000 千円)	(500 千円)
機械の真直度	$5\mu\text{m}$	$5\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$ 以下
加工の溝幅	$6\mu\text{m}$	$6\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$ 以下
微細加工の精度	$2\mu\text{m}$	$0.5\mu\text{m}$	$0.5\mu\text{m}$

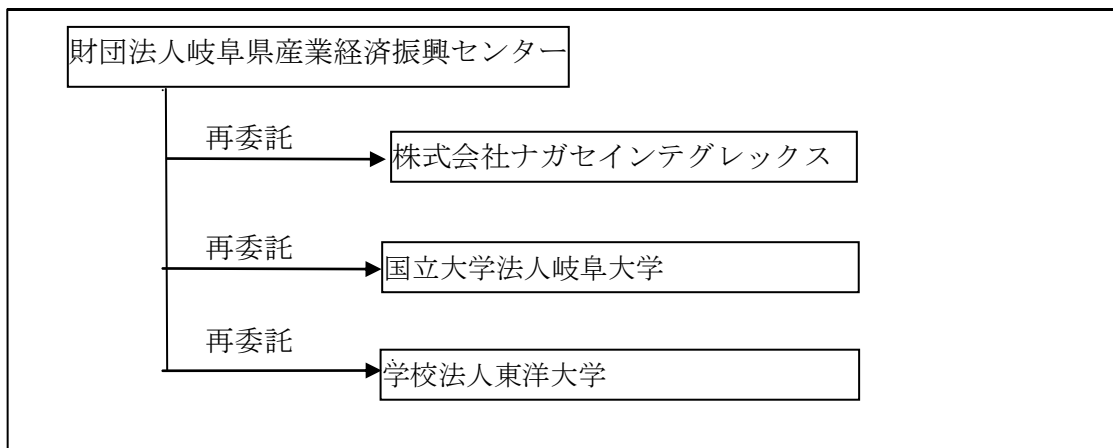
表 1.2 実施内容

実 施 内 容	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月
1.超精密加工機械への対応								
1.1レーザー加工ユニットの開発								
1.2高精度位置決め機能の検討								
2.加工技術への対応								
2.1加工技術の開発								
2.2微細加工の検証及び評価								
3.プロジェクトの運営管理								
・研究開発委員会の開催								
・報告書の作成								

1-2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

1), 研究組織(全体)

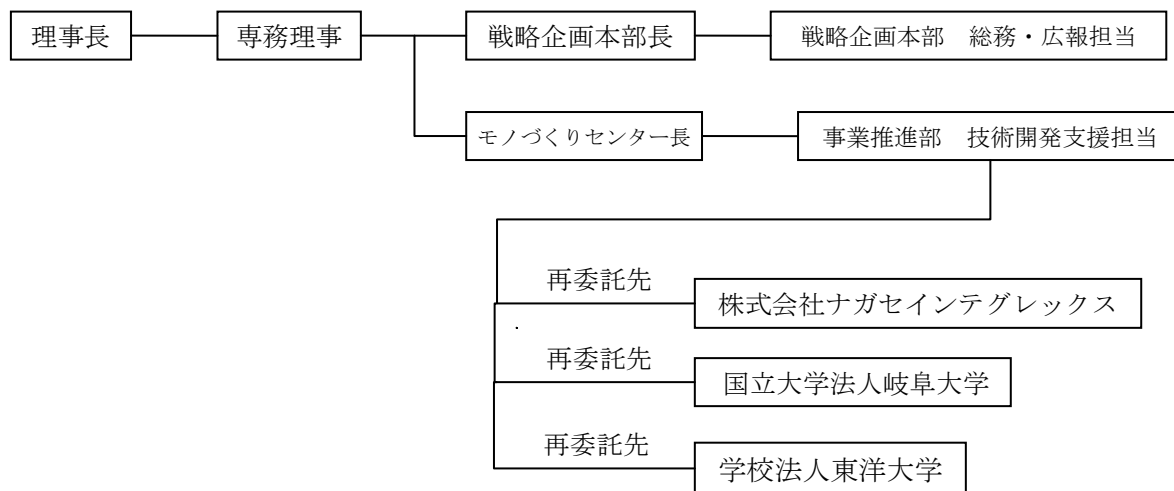


総括研究代表者（P L） 所属：株式会社ナガセインテグレックス 役職：製造部副部長 氏名：板津武志	副総括研究代表者（S L） 所属：国立大学法人岐阜大学 役職：工学部准教授 氏名：井上吉弘
---	---

2),管理体制

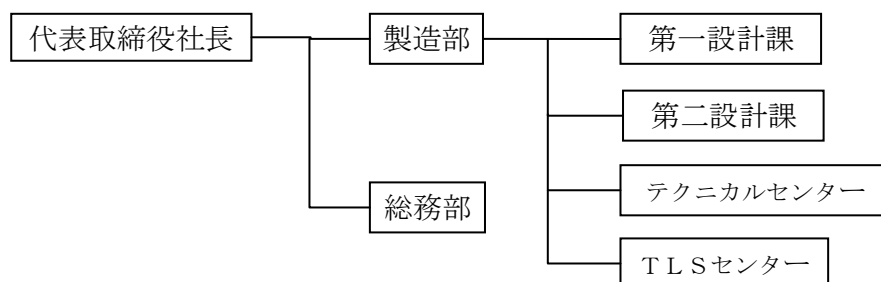
①事業管理者

財団法人岐阜県産業経済振興センター

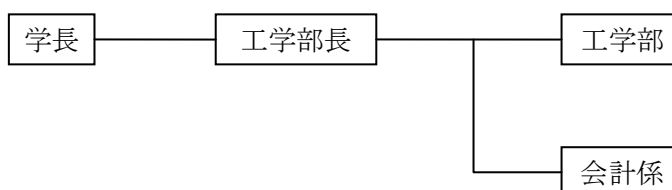


②再委託先

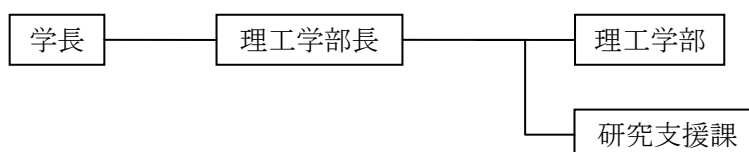
- ・株式会社ナガセインテグレックス



- ・国立大学法人岐阜大学



- ・学校法人東洋大学



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】財団法人岐阜県産業経済振興センター

管理員

氏名	所属・役職	実施内容
石樽 芳直	理事兼モノづくりセンター長	③
宮田 富	事業推進部 部長	③
繁田 栄司	事業推進部 参事	③
加納 剛	事業推進部 管理員	③
瀬瀬 まゆみ	戦略企画本部 主任	③

【再委託先】

研究員

株式会社ナガセインテグレックス

氏名	所属・役職	実施内容
長瀬 幸泰	代表取締役社長	① ②
板津 武志	製造部 副部長	① ②
山村 誠	製造部 次長	① ②
木村 吉行	製造部 次長補佐	① ②
高橋 宏史	製造部 第二設計 課長	① ②
後藤 尚哉	製造部 第二設計 リーダー	① ②
野倉 健一	製造部 第二組立 第七係 係長補佐	① ②
村瀬 信義	製造部 制御設計 課長	① ②
内田 聖一	テクニカルセンター	① ②
新藤 良太	製造部 次長	① ②
河村 翔太	製造部 第一設計	① ②
松本 義充	TLS センター センター長	① ②

国立大学法人岐阜大学

氏名	所属・役職	実施内容
井上 吉弘	工学部准教授	①
加藤 隆雄	工学部准教授	①

学校法人東洋大学

氏名	所属・役職	実施内容
吉田善一	理工学部・学部長・教授	②
内田貴司	理工学部・助教	②

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理者)

財団法人岐阜県産業経済振興センター

(経理担当者) 戦略企画本部主任 瀬瀬 まゆみ

(業務管理者) モノづくりセンター事業推進部 加納 剛

(再委託先)

株式会社ナガセインテグレックス

(経理担当者) 総務部長 長野 義則

(業務管理者) 製造部副部長 板津 武志

国立大学法人岐阜大学

(経理担当者) 工学部外部資金係 市橋 昂

(業務管理者) 工学部准教授 井上 吉弘

学校法人東洋大学

(経理担当者) 研究支援課 課長補佐 師岡 隆介

(業務管理者) 研究支援課 課長 吉田 善一

(4) その他

なし

1-3 成果概要

(油圧振動の低減機構開発について)

- ・脈動が発生するメカニズムに関して詳しく研究を行った。
- ・可視化実験を通じて、レイノルズ数と脈動の関係について多くの知見を得た。

(温度自律補正機能の開発について)

- ・自律温調システムの実現に向けて、その回路を構想した。
- ・自律温調システムに必要な熱交換器に関して、シミュレーションによる解析を行った。

(加工主軸の開発について)

- ・回転指令や発熱量をセンサで測定し、その情報をもとに静圧油の温度や流量を制御して、振動や熱変形を抑え、安定して回転する主軸の設計を行った。

(レーザー加工ユニットの開発について)

- ・SS(Solid State)レーザー装置を搭載したレーザー加工ユニットを開発した。

(加工技術の開発について)

- ・開発したレーザー加工ユニットにて、ワークに加工を行い、加工精度の検証を行った。

その結果、表 1.1 に示した技術的目標値のうち

1, 加工の溝幅

2, 微細加工の精度

について、委託期間中の目標値を達成できた。

(微細加工の検証及び評価について)

- ・開発したレーザー加工ユニットにて、ポリイミドへの加工を行い、熱に弱い等の理由で従来のレーザーでは加工が困難だった材料について、加工が可能であることを確認した。
- ・開発したレーザー加工ユニットにて、グラッシーカーボンへの加工を行い、立体的な形状の加工が可能であることを確認した。

表 1.3 目標値に対する実測値一覧

区分	現状	委託期間中の目標値	目標値	実測値
機械位置決め精度	1 μ m	0.5 μ m	0.5 μ m	(X 軸) 0.39~0.40 μ m
				(Y 軸) 0.31~0.42 μ m
				(Z 軸) 0.14~0.22 μ m
機械振動	2 0 0 nm	2 0 0 n m	1 0 nm	50nm
工具軸再現性	0. 2 μ m	0. 2 μ m	5 0 nm	0.15~0.20 μ m
加工形状精度	2 μ m	1.5 μ m	1.5 μ m	1.5~2.0 μ m
加工表面粗さ	1 0 S	1 0 S	0. 2 S	1.7S
ワーク加工時間	(100 時間)	(10 時間)	(10 時間)	未評価
加工コスト	(1,000 千円)	(1,000 千円)	(500 千円)	未評価
機械の真直度	5 μ m	5 μ m	1 μ m以下	未評価
加工の溝幅	6 μ m	6 μ m	1 μ m以下	2.15 μ m
微細加工の精度	2 μ m	0.5 μ m	0.5 μ m	0.45 μ m

※ 振動低減機構や温調装置の実装までは今回行えなかったため、加工の溝幅と微細加工の精度以外は前回報告の実測値より変化はない。

※ ワーク加工時間、加工コストについては、それらを確認するためのワークの選定や加工条件などを現在検討中である。

※ 機械の真直度については、温調装置などの周辺機器を搭載したのちに測定する予定であるため、現状は未評価である。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

財団法人岐阜県産業経済振興センター 事業推進部 加納 剛

所在地: 岐阜県岐阜市藪田南 5 丁目 14 番 53 号

電話: 058-277-1093

FAX: 058-273-5961

E-mail: gifu-sapoin@gpc-gifu.or.jp

第2章 本論

2-1 超精密加工機への対応

2-1-1 高精度位置決め機能の検討

2-1-1-1 油圧振動の低減機構開発

油圧振動の低減機構の開発のために、静圧実験装置を用いた振動の変位測定と、モデル流路を用いた可視化観察を行った。

2-1-1-1-1 静圧実験装置を用いた振動の変位測定

静圧実験装置を用いた実験では、作動油およびその温度が不変であるとすれば、装置の運転条件として、油供給ユニットの圧力、軸受すきま、そして絞り係数を考慮すればよい。運転条件から油流量は従属的に決定され、油圧回路内の流れパラメータが得られる。このため、油流量をより精確に測定する必要がある、本研究で重量式流量測定装置を新規に製作した。製作した装置を用いて実験を行った結果、振動の変位に関する有効な知見が得られた。

2-1-1-1-2 モデル流路を用いた可視化観察

振動変位測定の結果から、油圧回路内の絞り部前後の流路を簡略化し、可視化観察用のモデル流路を製作した。一般に、絞りからの流れは噴流と呼ばれ、層流状態と乱流状態があることが知られている。噴流の状態を決定づける因子として、絞りの形状と流れの初期かく乱状態を考慮する必要がある。このため本研究では、初期かく乱状態を模擬できるよう、脈動発生装置を新規に製作した。その装置を用いた可視化観察結果より、噴流に関する有効な知見が得られた。

2-1-1-2 温度自律補正機能の開発

2-1-1-2-1 温度自律補正機能の概要と目的

精密な加工を行うためには、精密な温度の制御が不可欠である。考慮すべき温度としては、油温、ワーク温度、環境温度などがあるが、これらの温度を精密に制御するためには多くの温調装置や多量の電力を消費するチャンバー、もしくは工場スケールでの大規模な温調が必要となる。また、考慮すべき温度は一か所のみではなく、機械全体のバランスを考えて調整しなければ、機械内の温度分布によってわずかな歪みが発生し、それが超精密加工においては決定的な欠点となってしまう。

現状の精密加工機は、上に述べたように多量のエネルギー消費の上に成り立っており、それでもなお、理想とする温度制御を追究しきれていない。そこで、本研究では油の温度、軸の位置、クーラント温度をそれぞれ、機械温度、スケール温度、ワーク温度を参照し、その温度に対して補正をかける自律制御を行うシステムを開発し、それによって過剰な温調に頼らずとも超精密加工が可能な省エネ・省スペースな加工機の開発を目指す。

2-1-1-2-2 現状の温調回路

現在の温度調整回路を簡略化して図示すると図 2.1 のようになる。

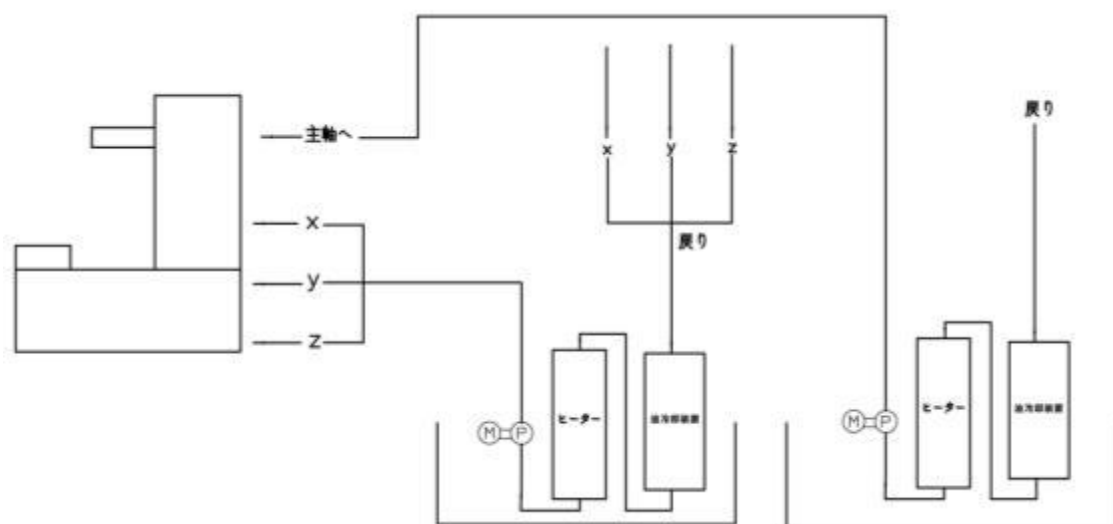


図 2.1 現状の温度調整回路の簡略図

各タンクにはポンプ、モータ、ヒータ、油冷却装置が備わっており、油冷却装置によって冷やされた油が、ヒータによって適度な温度に温められ、それをポンプとモータによって機械各部へ送り出している。そして機械各部を経由した後、油はタンクに戻り、再び油冷却装置によって冷却し、ヒータによって加熱し、機械各部へ、という手順を繰り返している。

この仕組みにはいくつかの問題点がある。まず各タンクに油冷却装置、ヒータが必要になるので、電力消費量が大きい点がある。また、各装置を置くためのスペースも必要になる。その他、一度過度に冷却をし、再びそれを温めるというプロセスはそれ自体に無駄がある。機械の精度の点からみても問題があり、一つのタンク内で温調された油をそのまま、各軸、各箇所を送るので、例えば、**x** 軸では適度な油の温度をしていたとしても、**y** 軸では冷やしすぎているという状態になることも考えられる。つまり、機体各所ごとの状況に応じた適切な温度調整が不可能なので、その分の温度分布が精度誤差につながってしまうのである。

温調の仕組みを見直すことで、電力を多く消費する部分を削減し、また画一的ではなく、機体各所に応じた温度を各部が自律的に調整できるようになれば、省エネ・省コスト・高精度化を同時に達成することができる。そのための自律温調補正機能を構想したので、それについて次項で説明する。

2-1-1-2-3 構想中の自律温調補正回路

前節に記述した問題を解決するために、本研究では自律的な温調システムを構想した。どのようなシステムかという、まず機体各所での温度分布をセンサによって調べ、それに対して機械各部の冷却能力を調節して、全体の温度バランスを保つというものである。また、以前は機械各所ごとに冷却装置が必要だったが、構想したシステムでは冷却装置が統一されるので、省エネ・省スペース化が可能である。

しかし、この仕組みを導入するに当たっては問題点がある。適切な熱交換器の設計である。熱交換器を用いた温調が従来のもよりも電力やスペースを多く必要とするものでは意味がないので、効率的かつ十分に冷却の行える熱交換器が必要になる。

次項では、本章で説明した自律温調システムを実現するために、熱流体シミュレーションを利用した熱交換器の設計検討を行ったので、それについて説明する。

2-1-1-2-4 シミュレーション解析を利用した温調装置用熱交換器の設計

本研究の目的は、自律的な温調による機械精度の向上のほか、省エネ・省スペース化の実現もある。ゆえに、必要とされる熱交換器の性能としては、

1,冷却効率が良いこと

→、油温調整を十分に行うためには高い冷却能力が必要である。

2,多くのスペースを必要としないこと、

→、冷却するために多くのスペースが必要となると、そのぶんの配管に多くの無駄が発生し、コストが上昇してしまう。また、熱交換器自体が大型になると、流体を送り出すためのエネルギーに無駄がでてしまう。

大きくは以上の二点が要求される。

これらの条件を満たすことを目標に、熱交換器として図 2.2 のようならせん状の熱交換器を考案した。構成としては大きく二つに分かれており、一つは図 2.2 に示した、油の流れるらせん状の管で、もうひとつは図 2.3 の、らせん状の部分を取り囲み、内部に冷却用の水が流れるジャケット部である。これらを組み合わせた時の状態の断面図を図 2.4 に示す。



図 2.2 考案したらせん状の熱交換器



図 2.3 らせん状の油圧管を取り囲むための冷却ジャケット

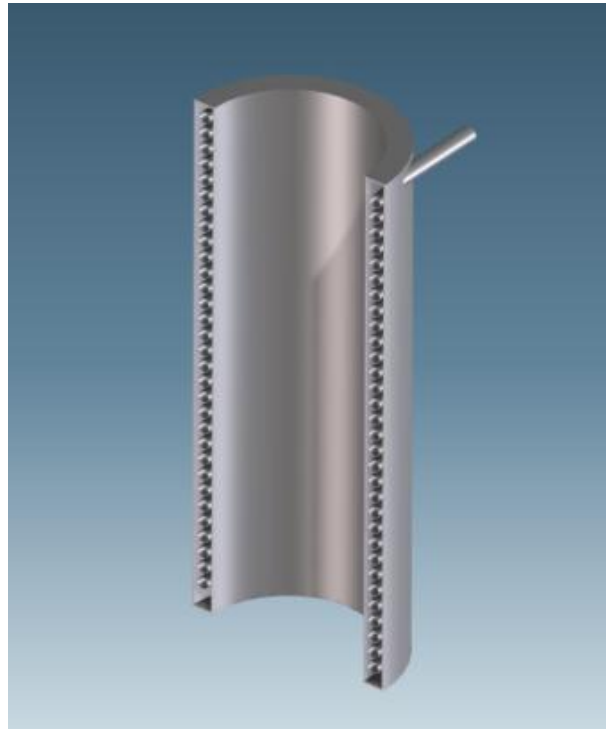


図 2.4 熱交換器の断面図

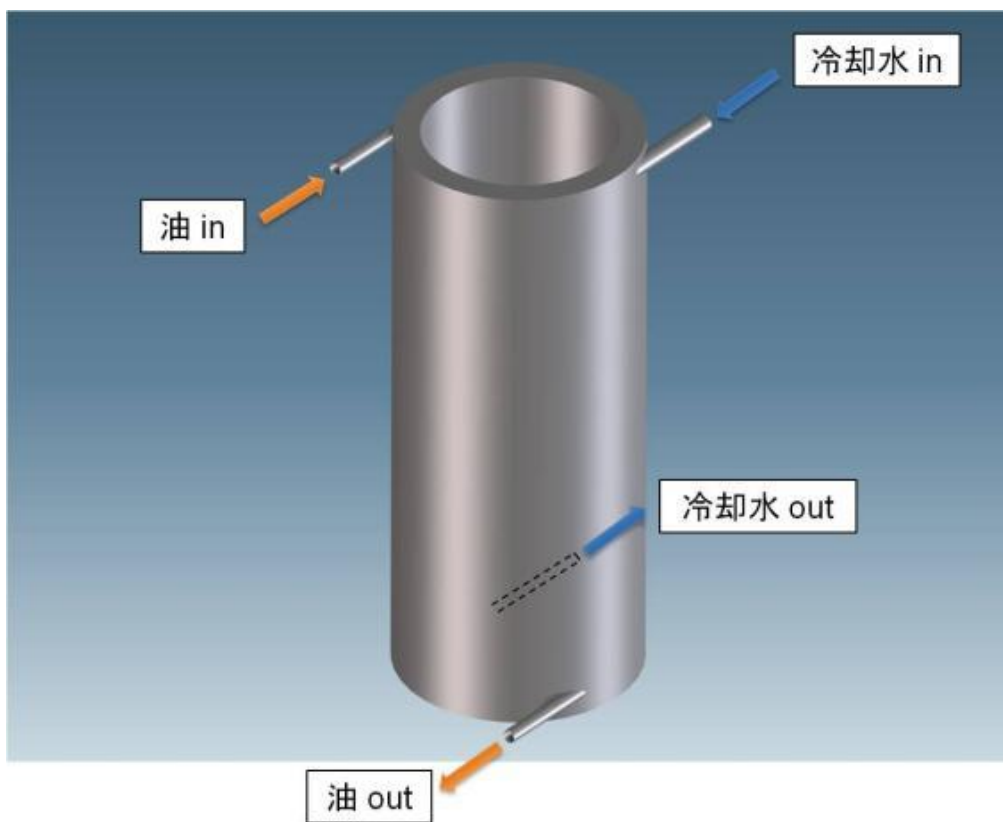


図 2.5 熱交換器の流体の流れ

このモデルについて、らせん状の管には油を、ジャケット内には冷却水を流すという熱流体シミュレーションを行った。流体の通し方を図 2.5 に示す。らせん状の配管には油を通し、ジャケット内部には冷却水を通した時の温度変化を調べた。設定としては、油については、 24.5°C の油を $1\text{L}/\text{min}$ で流し、冷却水は 20°C の水を $6\text{L}/\text{min}$ で流した。

解析の結果について、まず油温についての解析結果を図 2.6 に示す。管入口では高温だった油が、らせん状の管の出口に近づくにしたがって、温度が低下していくのが分かる。数値としては、入口で 24.5°C だった油を、出口付近では 21.5°C まで冷却することができた

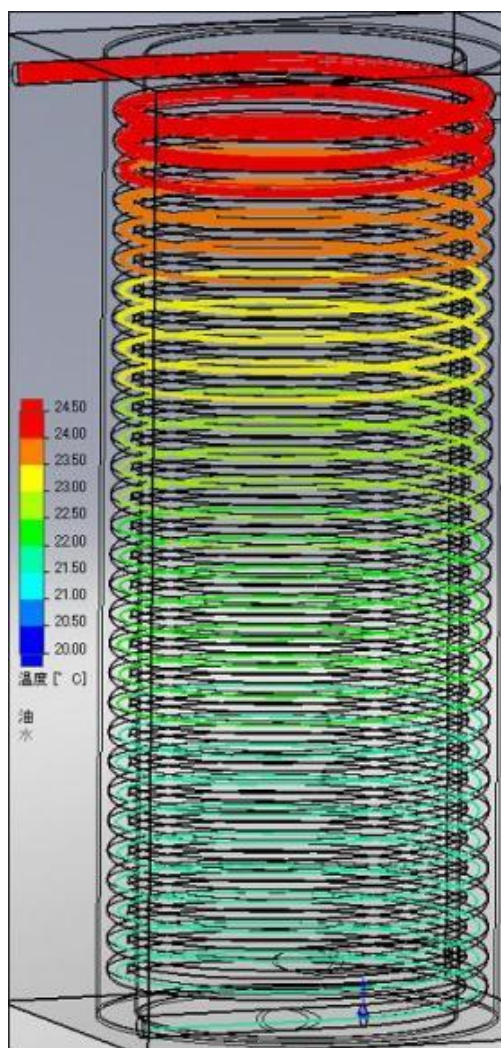


図 2.6 熱交換器内の油の温度変化の解析結果

続いて、図 2.7 に冷却水についての解析結果を示す。冷却水が入口から出口に近づくにしたがって、少しだけ温まり、温度が上昇するのが分かる。数値としては、入口で 20°C だった冷却水は、出口では 20.6 度まで上昇した。

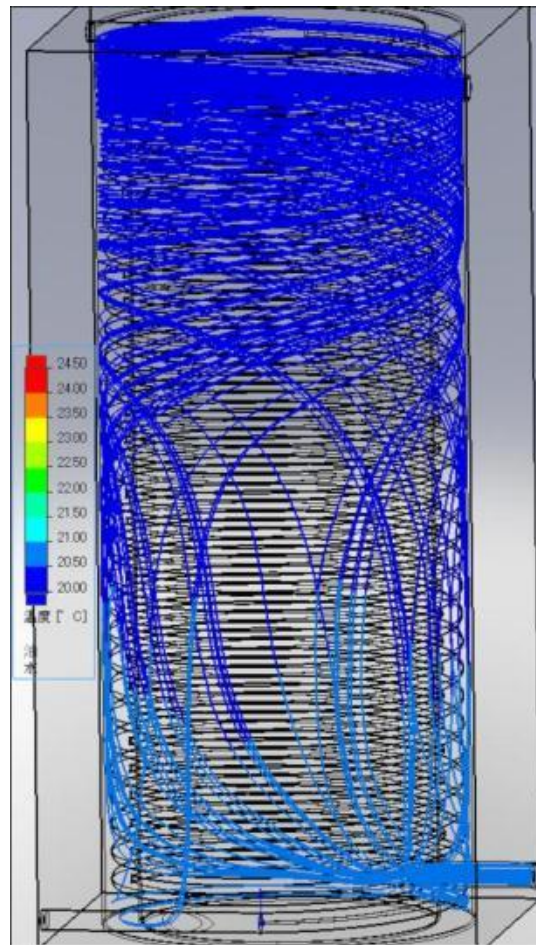


図 2.7 熱交換器内の油の温度変化の解析結果

熱交換器の性能を表す指標の一つとしては温度効率がある。温度効率は以下の式にて計算する。

$$\text{高温側の流体の温度効率: } \eta_h = \frac{T_i - T_e}{T_i - t_i}$$

$$\text{低温側の流体の温度効率: } \eta_c = \frac{t_e - t_i}{T_i - t_i}$$

(T: 高温側の流体温度, t: 低温側の流体温度, i: 入口側, e: 出口側)

この式によって、本モデルの温度効率を求めると、高温側の油については 0.67、低温側の冷却水については 0.13 となる。

解析の結果は、油と冷却水の流量、流速によって変化するので、今後も条件を変えて計算を行い、より熱交換器として適した条件を探していく予定である。

また、熱交換器の性能を高める手段として、管をどう取りまわすかだけでなく、管自体について、多葉の形状を採用し、この管に油を通した時の解析も行った。ただの丸い管に油を流すのではなく、管を多葉状に曲げて表面積を稼ぐことにより、冷却効率の上昇を狙ったモデルである。

このモデルについての解析結果を図 2.8 に示す。

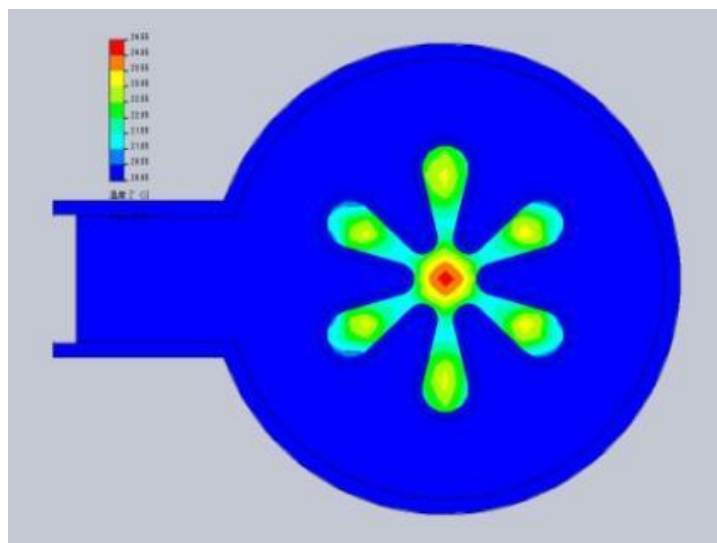


図 2.8 多葉状の配管の熱交換解析結果

通常の丸い管では、管外周のみが冷えてしまうが、本モデルならばムラの少ない効率的な冷却ができていることが分かる。

この解析結果を足がかりにし、今後も熱交換器としてより適切な管の形状を追究していく予定である。

2-1-1-3 加工主軸の開発

加工精度及び面粗さを上げるためには、工具を取り付ける加工主軸も問題となる。主軸の停止時と回転時の位置関係に変化が起これば、同じ位置を工具が通過せず、その結果ワーク表面に段差や筋が発生してしまうからである。この対策として、前述の油圧振動の低減機構の開発及び温度自律補正機能の開発による対策を行うとともに、これに対応する加工主軸の開発を行った。

開発した加工主軸のモデルを図 2.9 に示す。

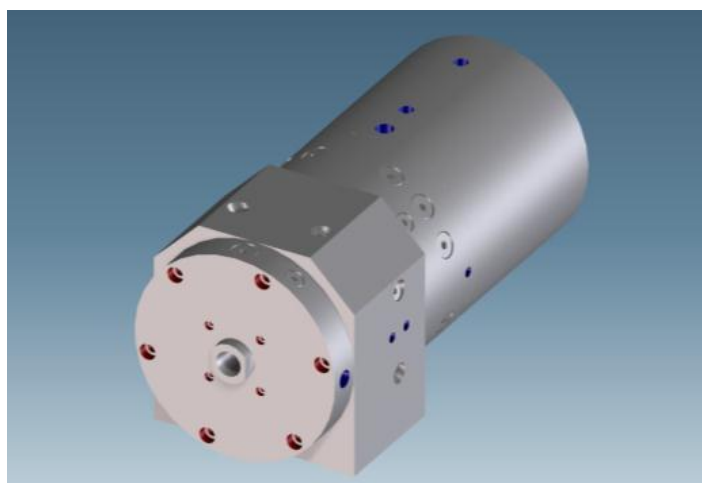


図 2.9 開発した加工主軸

この加工主軸は、状況に応じて独立した温度制御ができるようになっている。この機能を利用し、回転精度や発熱量といったパラメータを参考にして、静圧油の温度や流量を制御することによって振動と熱変形を抑え、加工軸を安定させる。振動低減機構や自律温調機能とともに機械に組み込めば、高い効果が得られると考えられる。

2-1-2 レーザー加工ユニットの開発

2-1-2-1 レーザー加工ユニットの概要と目的

バイトやミーリングスピンドルによる加工は物理的な接触が前提としてあるものであり、それは微細加工を行う際、大きな制約となる。また、加工の内容も単純な形状創成加工が限度である。

一方、レーザーによる加工ならば、非接触でワークの加工が可能であるため、バイトなどでは不可能な機能創成を含めた微細な加工が可能となる。そこで本研究では、特殊な SS レーザー発振器を採用し、その他に加工用対物レンズ、高剛性治具と組み合わせた独自のレーザー加工ユニットの開発を行った。そして、開発した加工ユニットを本研究の超精密加工機に組み込んで実際に加工を行い、その精度や品位を検証するとともに、高精度なレーザー加工だからこそできる特殊な加工の探究を行った。

2-1-2-2 開発したレーザー加工ユニットについて

本研究で開発したレーザー加工ユニットは、大きくはレーザー発振器、対物レンズ、そしてそれらを支持する高剛性治具の 3 点で構成されている。使用したレーザー発振器は通常のものとは違う特殊なレーザーである。そのレーザーを用いれば加工が可能だと考えられている例として、図 2.10 に示すような構造色の加工がある。

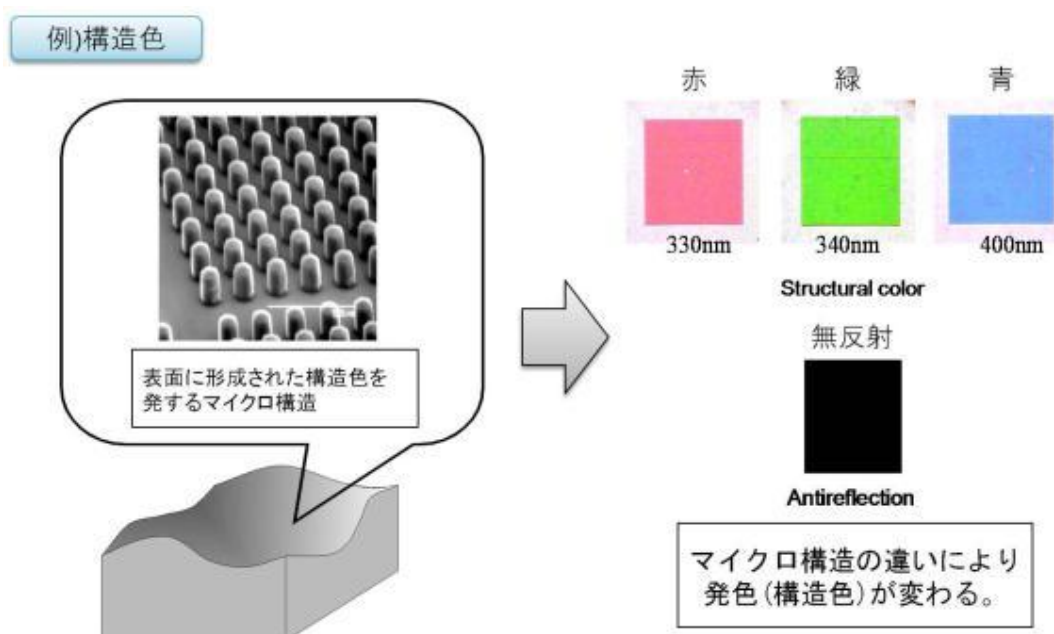


図 2.10 レーザーによる構造色の加工例

レーザーによって素材の表面にマイクロ構造を作製し、構造に応じて特定の色を発色したり、完全な黒色を作りだしたりすることができる。こういった加工ができるようになることも本研究の目指す点の一つである。

次に、レーザー発振装置を支える高剛性治具についての詳細を図 2.11 に示す。

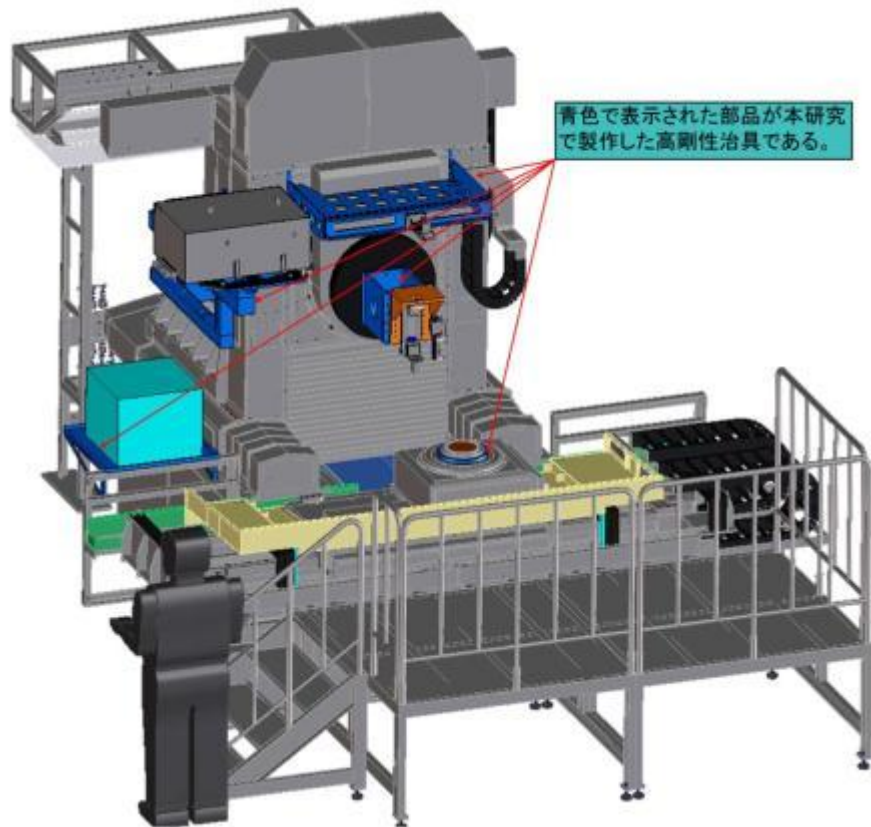


図 2.11 レーザー加工ユニットの高剛性治具部詳細

図中の青い部分が製作した高剛性治具である。振動に対する対策として、レーザー発振器の台はあえて床には設置せず、十分な剛性の確保されている本体と一体にするようにした。こうすることにより床からの外乱の影響を避けることができる。また、本体中央上部の折り返しミラーを保持する治具にはアルミを用いた。これは、鉄を用いた治具にするとその重量で機械が変形し、加工に影響を与える恐れがあったためである。その他の部分についても機械の精度を保持しつつ、しっかりとレーザー発振装置が保持できるように設計してある。

2-2 加工技術への対応

2-2-1 加工技術の開発

加工技術の開発のための加工精度の検証として、開発したレーザー加工ユニットを用いて青板ガラスへの溝加工を行った。具体的な検証点は2点ある。一つは加工した溝の線幅で、もうひとつは微細加工の精度として、連続して加工した際の各溝のピッチ精度である。

表 1.1 でも示したように、それぞれの目標値は $6\mu\text{m}$ と、 $0.5\mu\text{m}$ である。
加工時の対物レンズ付近の様子を図 2.12 に示す。

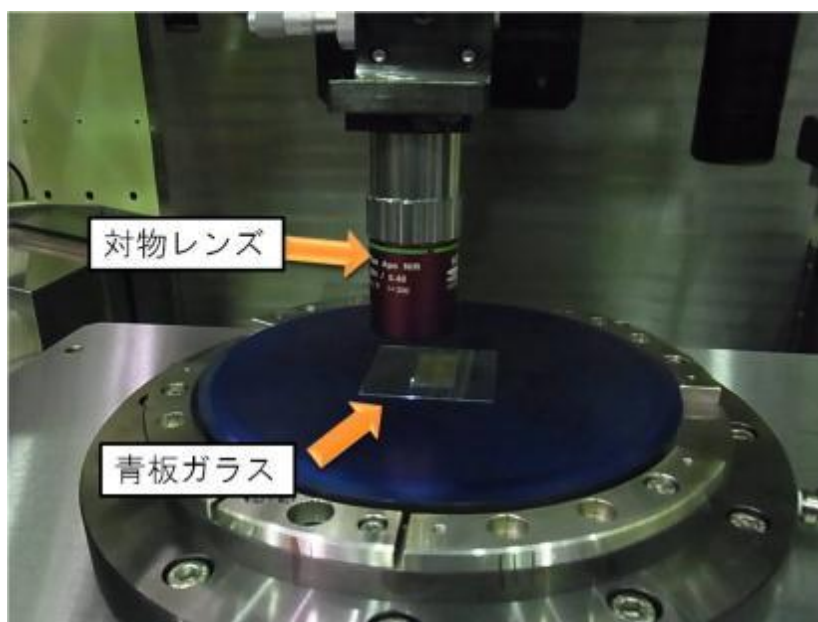


図 2.12 青板ガラスへの加工部拡大

まず溝幅についての加工の結果を述べる。図 2.13 が溝加工後のガラス表面を CCD(Charge Coupled Device)カメラによって観察したときの画像である。

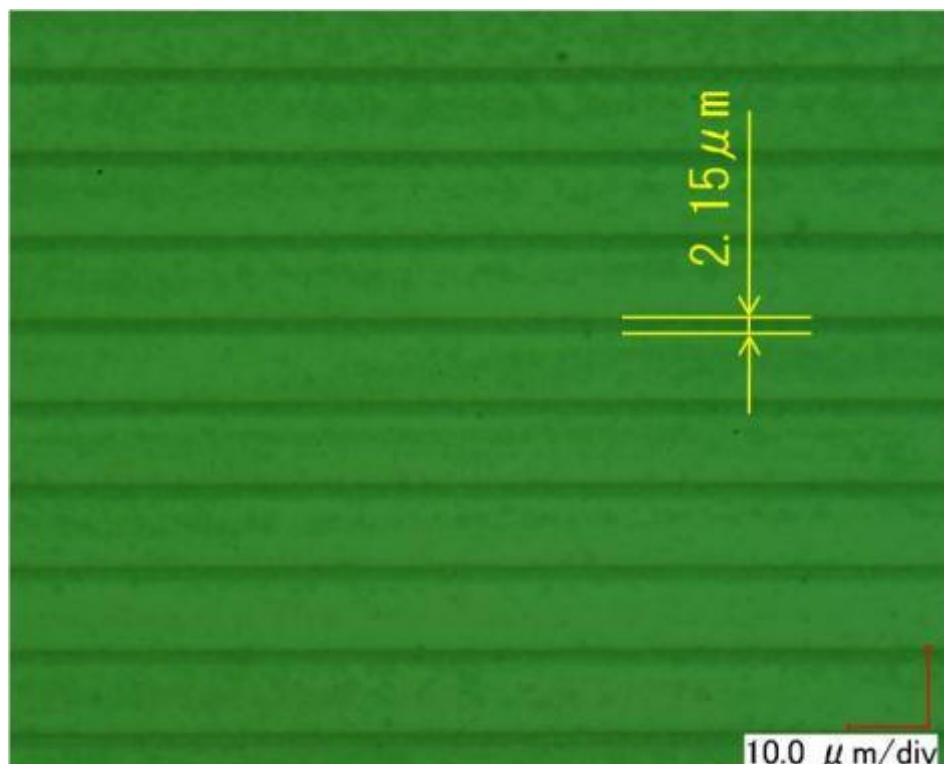


図 2.13 CCD カメラによって観察した青板ガラスへの溝加工

続いて、同じワークについて SEM(Scanning Electron Microscope)で観察を行ったのが 図 2.14 である。

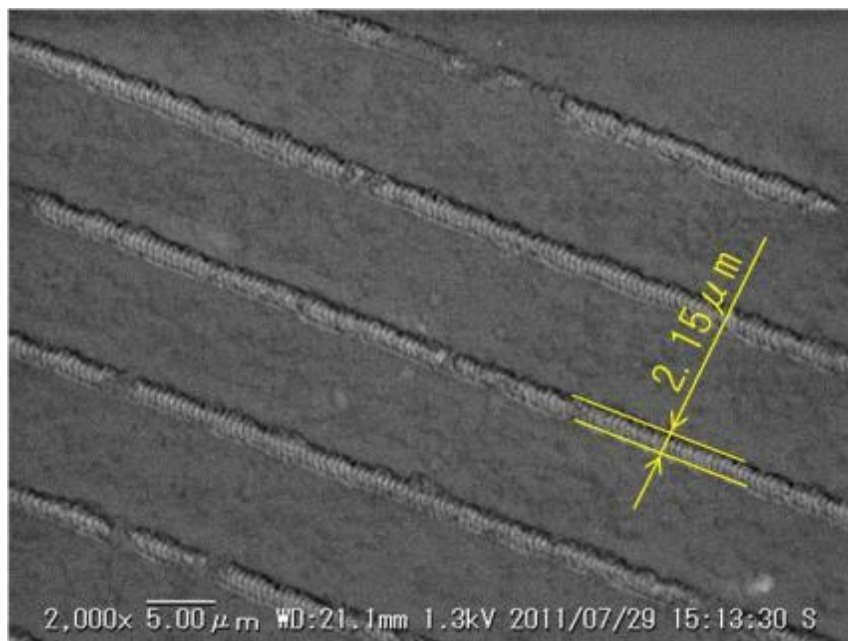


図 2.14 SEM によって観察した青板ガラスへの溝加工

どちらも、画像からの計測で、溝幅は $2.15\ \mu\text{m}$ であることが分かった。

また、本研究のレーザー加工ユニットと、従来の YAG(Yttrium Aluminum Garnet)レーザー加工機でそれぞれ溝加工を行い、その品位を比較した。それぞれの加工結果を図 2.15, 2.16 に示す。

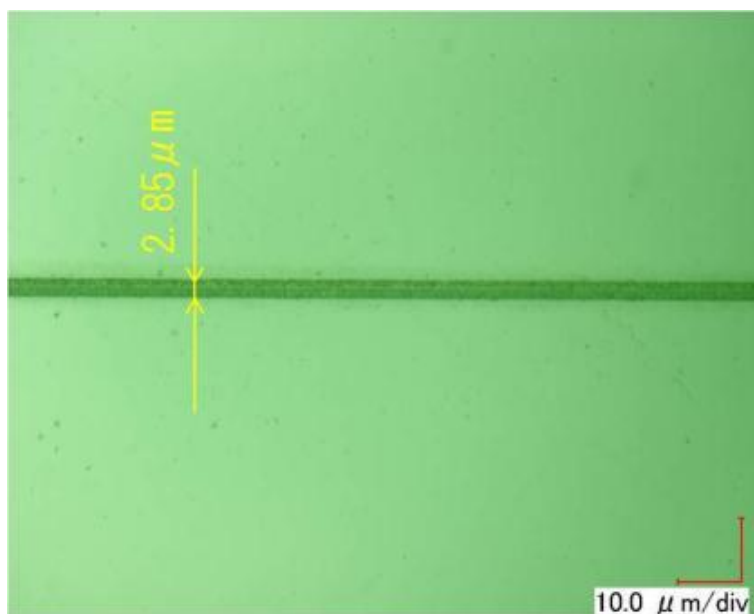


図 2.15 本研究のレーザー加工ユニットによる溝加工結果

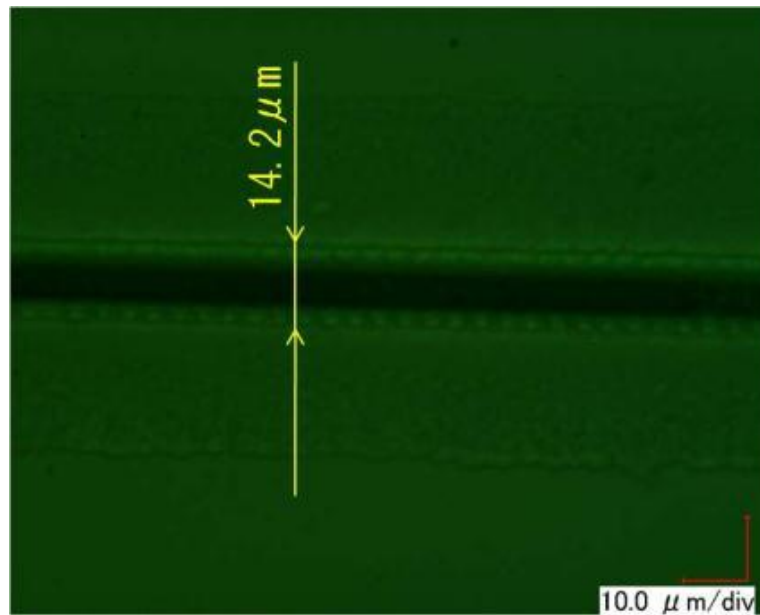


図 2.16 YAG レーザーによる溝加工結果

本研究で用いているレーザー発振器は、その特性として余計な熱の発生量が極めて少ない。ゆえに、図 2.16 のように、従来加工に用いられていた YAG レーザーでは、ワークが強く熱の影響を受けていたが、SS レーザーならば図 2.15 のようにワークに変質のない、きれいな加工が可能である。

次に、微細加工の精度の検証として、青板ガラスに格子状の溝加工を行い、各溝のピッチを測定することで、どれだけ正確に加工が行えているかを検証した。図 2.17 に格子状の溝加工をした青板ガラスを、表 2.1 に各溝のピッチ精度の測定結果を示す。

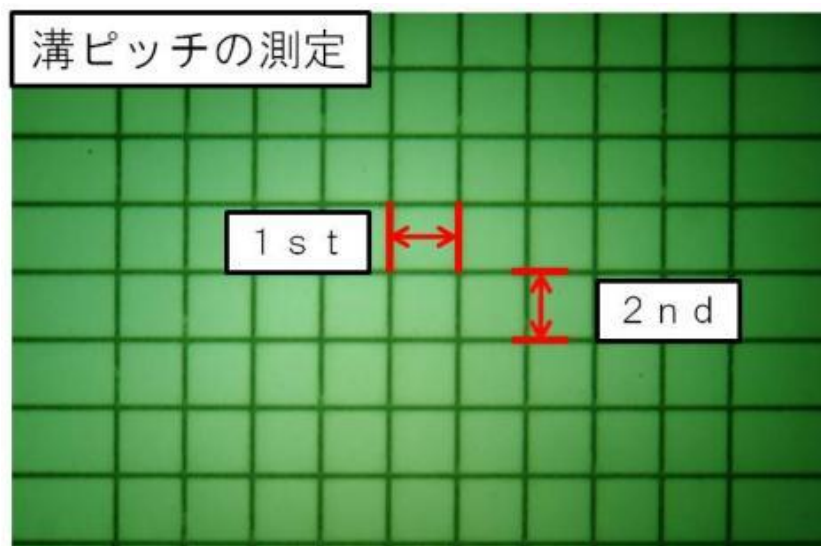


図 2.17 格子状の溝加工を行った青板ガラス

表 2.1 格子上の加工についての各溝のピッチ精度

溝ピッチ	指令値	1st		2nd	
		測定値	累積ピッチ	測定値	累積ピッチ
1本目	0	0	0	0	0
2本目	0.1	0.0999	0.0001	0.09985	0.00015
3本目	0.2	0.19985	0.00015	0.19984	0.00016
4本目	0.3	0.29982	0.00018	0.29961	0.00039
5本目	0.4	0.39959	0.00041	0.39955	0.00045
6本目	0.5	0.49975	0.00025	0.49968	0.00032
7本目	0.6	0.59961	0.00039	0.59984	0.00016
8本目	0.7	0.69957	0.00043	0.69975	0.00025
9本目	0.8	0.79972	0.00028	0.79966	0.00034
10本目	0.9	0.89989	0.00011	0.89977	0.00023
		誤差	0.00043	誤差	0.00045

測定の結果、指令値と測定値の差は最大でも $0.5\mu\text{m}$ 以内に収まっていることが確認できた。

以上、本項についてまとめると、まず青板ガラスの溝加工の結果から、目標値の溝の線幅 $6\mu\text{m}$ 以内が達成できたことを確認した。続いて、格子状に溝を加工し、その溝ピッチの計測の結果から、微細加工の精度 $0.5\mu\text{m}$ 以内を達成できたことを確認した。目標値等と合わせて表にしたものを表 2.2 に示す。

表 2.2 目標値に対する実測値一覧

区分	現状	委託期間中の目標値	目標値	実測値
加工の溝幅	$6\mu\text{m}$	$6\mu\text{m}$	$1\mu\text{m}$ 以下	$2.15\mu\text{m}$
微細加工の精度	$2\mu\text{m}$	$0.5\mu\text{m}$	$0.5\mu\text{m}$	$0.45\mu\text{m}$

本研究の主題である低振動化や温度補正機能が実現すれば、さらに高い精度での加工ができるようになると考えられる。

2-2-2 微細加工の検証及び評価

2-2-2-1 各種デバイス製作のための加工実験

本研究で用いているレーザー発振器の特性を生かすことで、従来では難しかった加工が可能になる。具体例として、フィルムなどの熱に弱い材料への加工がある。これについて説明するために、まずは本研究のレーザー加工ユニットと、従来の YAG レーザーによるポリイミドへの溝加工を行ったので、その結果について示す。

ポリイミドとは、強度に優れた高分子材料で、電気絶縁性も高く、フレキシブル基板などに利用されているものである。この材料を図 2.18 のように加工機上に設置し、溝加工を行った。

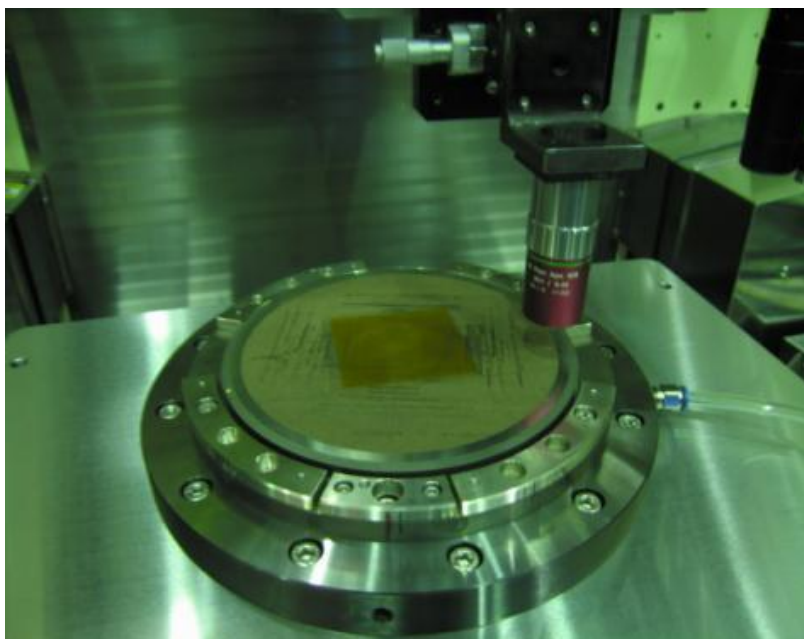
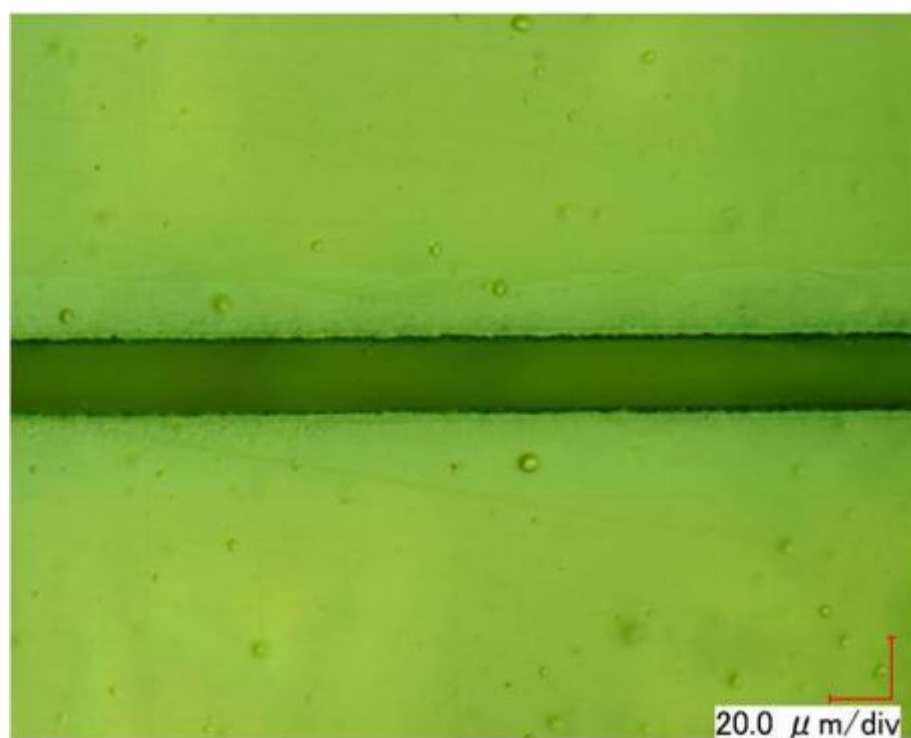
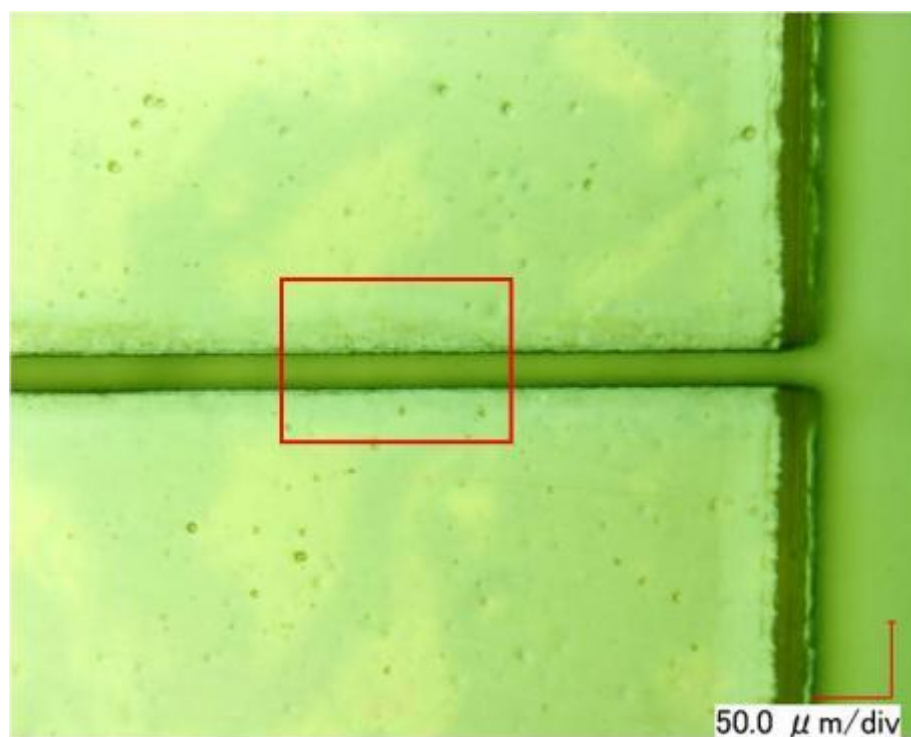


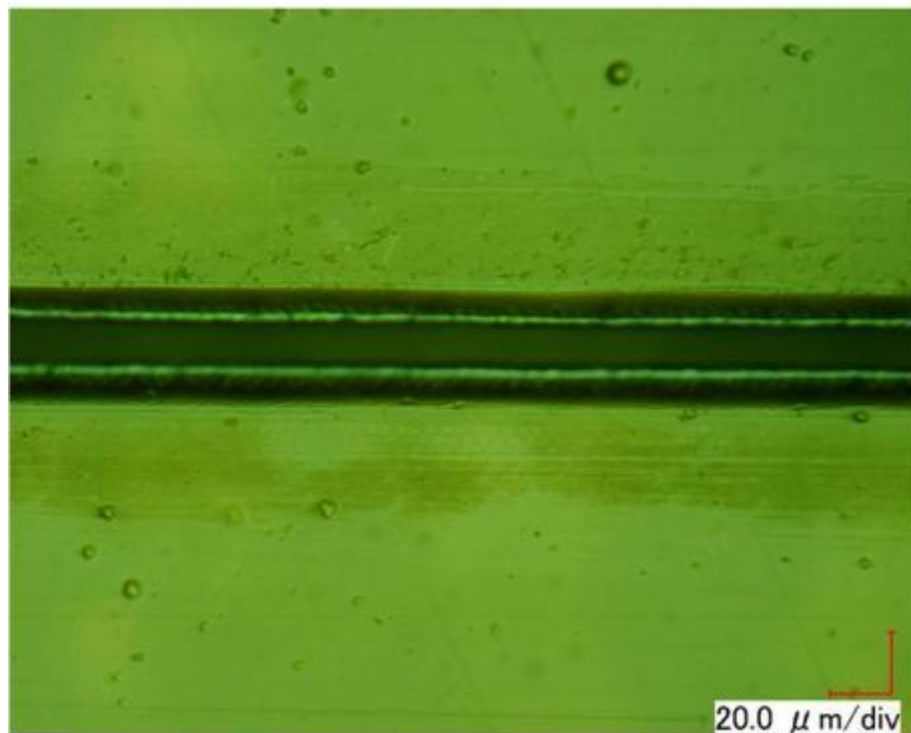
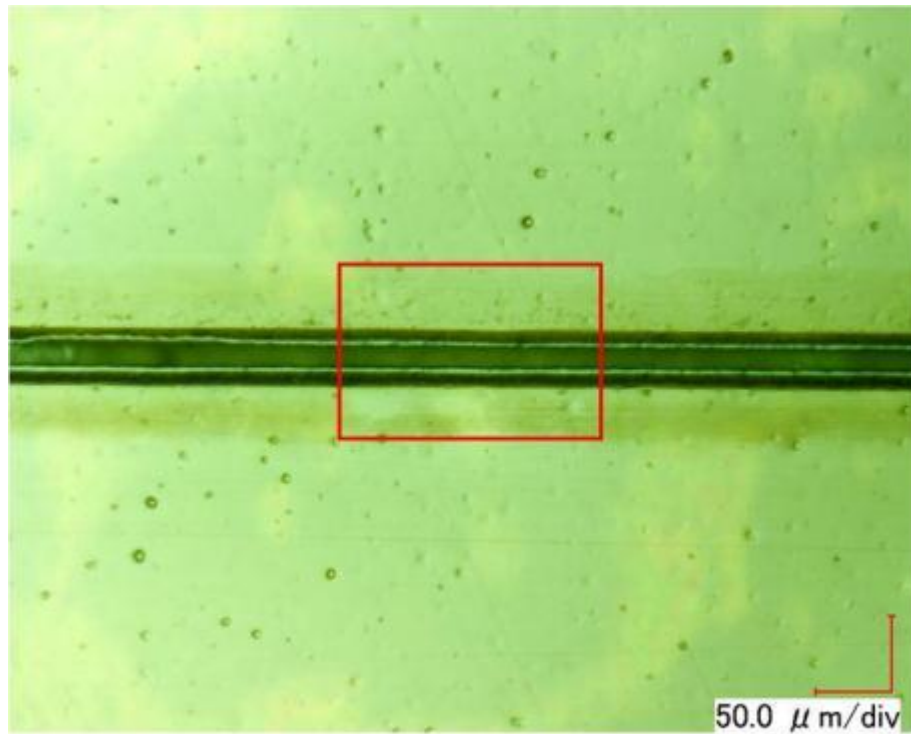
図 2.18 ポリイミドへのレーザー加工

同様の加工を YAG レーザーでも行った。それらの加工結果を図 2.19, 2.20 に示す。



(□で囲んだ部分の拡大図)

図 2.19 本研究のレーザー加工ユニットによるポリイミドへの溝加工結果



(□で囲んだ部分の拡大図)

図 2.20 YAG レーザーによるポリイミドへの溝加工結果

YAG レーザーでは熱の影響が大きいいため、溝両端が黒く変色してしまっている。一方、本研究で開発したレーザー加工ユニットならば、熱の影響が少なく、変色させずにきれいに加工ができているのが分かる。

このように、本研究のレーザー加工ユニットならば、フィルムなどの熱に弱い材料の加工も可能になると考えられる。この特性を応用できる例としては μ TAS への応用がある。 μ TAS (micro total analysis systems) とは、カードサイズ以下の一つのチップ上に、微量流体の成分分析装置を構築したデバイスである。このデバイスを利用すれば、血液検査や DNA 検査をこれまでよりも早く、かつ精度よく行えるほか、試料の低減も可能なので、患者の負担を減らすこともできる。 μ TAS の実現にあたって問題になるのは、どうやってチップ上にパターンを加工するかであるが、本研究のレーザー加工ユニットならば、高い精度と品位でフィルム等に加工が可能であるため、 μ TAS 実現のための一つの手段として期待ができる。

上記の特性以外にも、本研究のレーザー加工ユニットは、超精密加工機をベースとしているため、その加工精度を利用して、単純な形状を作る加工だけでなく構造自体に特殊な性能を持たせる機能創成の加工も可能であると考えられる。その検証のために、グラッシーカーボンへの加工実験を行った。グラッシーカーボンとはガス・溶液を透過せず、また優れた強度・硬度・電気伝導性を持った材料である。現在は電気化学計測機器などに利用されているが、この材料の表面に微細な形状の加工などができるようになれば、これまでにない特殊な性質を付与することが可能となるかもしれない。そこで、機能創成のための加工実験としてグラッシーカーボンへの凸形状の加工を行った。図 2.21 にグラッシーカーボンへの加工の様子を示す。

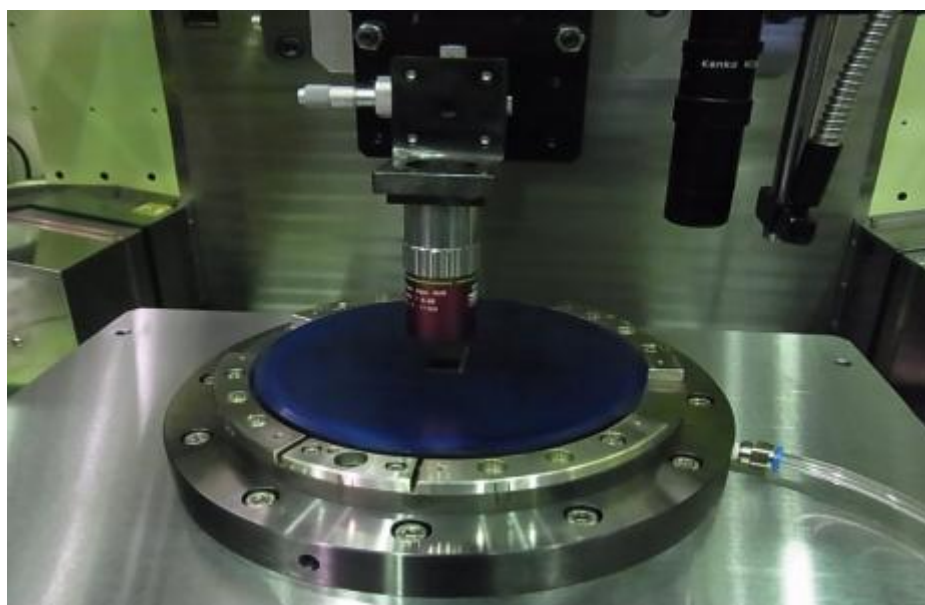


図 2.21 グラッシーカーボンへの加工の様子

次に、グラッシーカーボンへの加工後、それを SEM を用いて撮影したものを図 2.22 に示す。

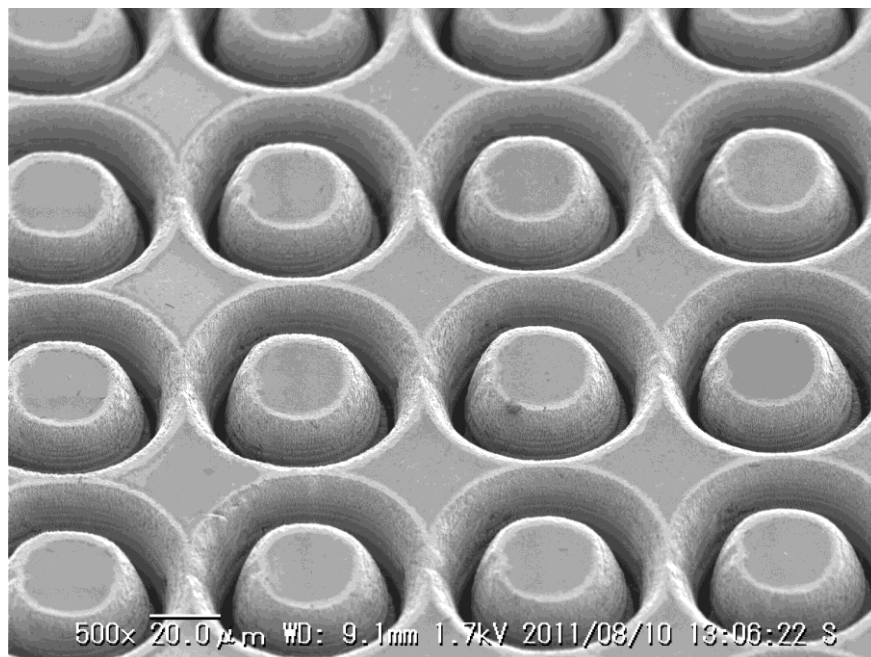


図 2.22 グラッシーカーボンに加工した凸形状

このように、グラッシーカーボン上に微細な凸形状を作成することができた。

今後も機能創成のための加工実験を重ね、構造色やマイクロリアクタ、マイクロレンズアレイなどの特殊な加工の実現を目指していく予定である。

2-2-2-2 照射雰囲気制御下でのグラッシーカーボン(GC)へのレーザー加工

照射雰囲気を真空中および低圧力酸素雰囲気中に制御し、GC に対してレーザー加工を行い、加工深さ、加工面粗さ等を評価した。SS レーザーによる加工との比較のため、UV レーザーを用いたレーザー加工機でも同様の加工を行い評価した。

加工ワークの GC は耐熱性の高い炭素材料であり、マイクロ金型への利用を想定し材料を選定した。表 2.3 に GC の仕様を示す。

表 2.3, GC の仕様

製品名	GC-20SS
製造会社	東海カーボン
サイズ	10×10×1 mm ³
表面粗さ	Ra 40nm
密度	1.51 g/cm ³
電気抵抗	42 μΩ
曲げ強度	147 N/mm ²
熱伝導率	5.8 W/m
耐熱温度	3000 °C

GC 表面に対し、20μm 径に集光したレーザーを照射し、レーザービームもしくは試料を走査することで 1×1mm² の角穴を加工した。どちらのレーザーを用いる場合も、加工条件を同一に設定し、レーザーによる差異を明確に比較できるようにした。加工後のワークの評価は超深度形状測定顕微鏡(株式会社キーエンス製 VK8500、以下レーザー顕微鏡とする)を用いて、加工深さや、加工底面の面粗さ、デブリの状態を評価した。

図 2.23 の光学写真から UV レーザー、SS レーザーいずれを用いた場合も、真空中での照射では加工痕以外の GC 表面に付着物が確認できる。これは、加工によるデブリが付着したためだと考えられる。一方、酸素雰囲気照射では GC 表面には付着物は確認されなかった。このような特徴は図 2.24 の光学顕微鏡写真でも見られた。さらに光学顕微鏡写真からは UV レーザー照射の場合に SS レーザー照射の場合よりもデブリ付着量が多く、さらにより大きい粒径のデブリが付着していることが分かった。光学写真と光学顕微鏡写真からわ

かったことをまとめると、①UV レーザーよりも SS レーザーの方がデブリの発生が少ない。②低圧酸素雰囲気ではデブリの発生が少ない。という特徴があげられる。②の理由として考えられることは、GC が炭素系物質であるため、レーザー照射により除去された GC が酸素と反応し一酸化炭素や二酸化炭素に変化し、GC 上への再付着が抑制できたためだと考えられる。

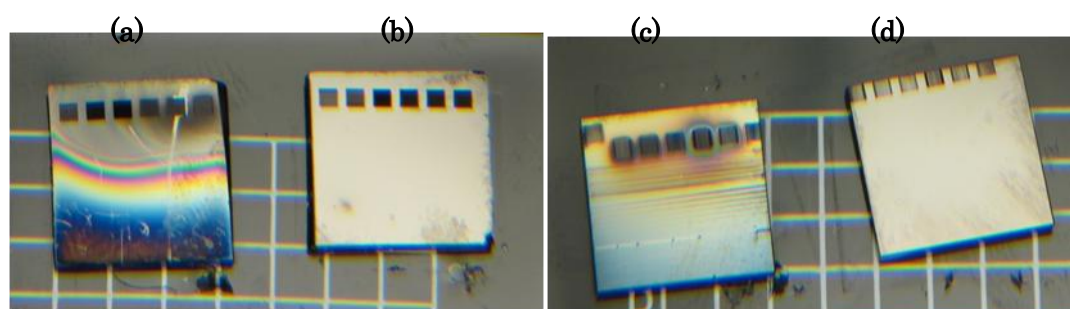


図 2.23. 加工後の GC の光学写真. (a) UV レーザー、真空中での加工. (b) UV レーザー、低圧酸素中での加工. (c) SS レーザー、真空中での加工. (d) SS レーザー、低圧酸素中での加工.

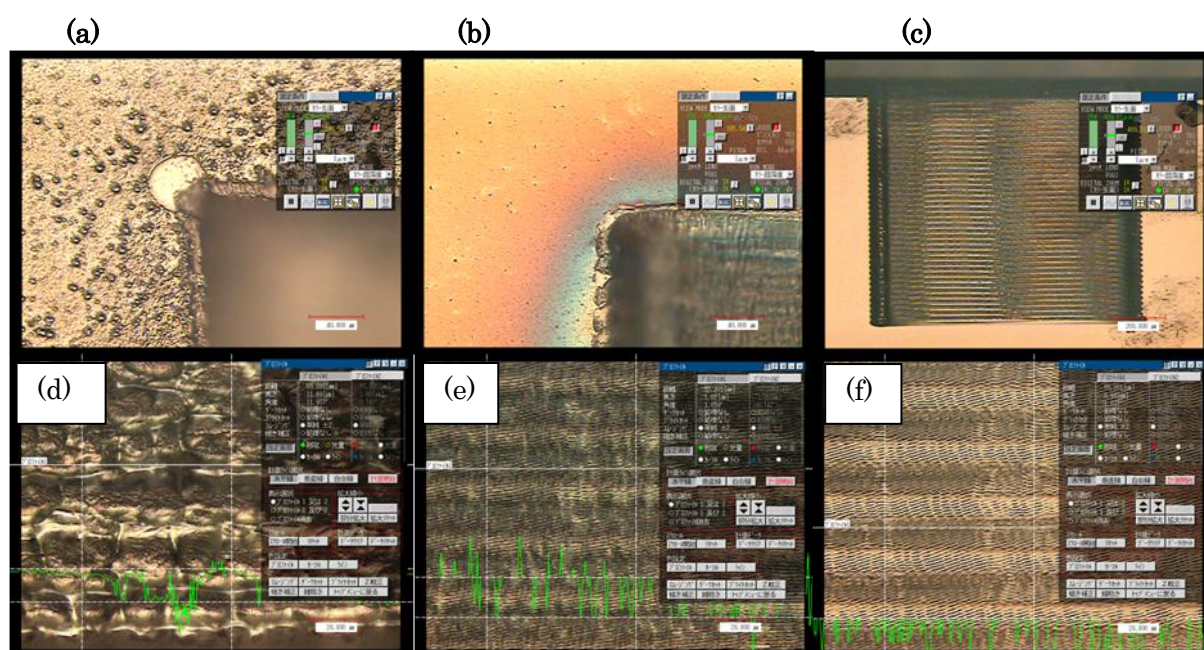


図 2.24. 加工後の GC の光学顕微鏡写真. (a), UV レーザー、加工条件 6 (真空中)での加工. (b), (a) と同条件の加工底面拡大図. (c), SS レーザー、加工条件 6 (真空中)での加工. (d), (c) と同条件の加工底面拡大図. (e), SS レーザー、加工条件 12 (低圧酸素中)での加工. (f), (e) と同条件の加工底面拡大図.

図 2.25 には UV レーザーおよび SS レーザーによる加工における加工深さの照射パルス数依存性を示す。照射雰囲気、レーザーの種類によらず、加工深さは照射パルス数に対し

てほぼ比例的に増加した。詳細に見ると UV レーザーによる加工では、照射雰囲気や重なり具合による違いは見られないが、SS レーザーでは重なり具合が 0.5 の場合により深い加工ができることが分かった。加工深さは照射パルス数 200000 の場合に、UV レーザーでは約 70 μm であったが、SS レーザーでは約 30 μm と小さかった。図 2.26 には UV レーザーおよび SS レーザーによる加工における加工底面の面粗さの照射パルス数依存性を示す。UV レーザーによる加工の場合は加工深さの場合とほぼ同じく照射パルス数に対して比例的に増加した。さらに重なり具合に大きく依存した。重なり具合が 0.75 の場合の方が面粗さが顕著に低かった。SS レーザーの場合はいずれの条件においても面粗さが 1.5 μm 以内になっており、UV レーザーの場合よりも顕著に低かった。

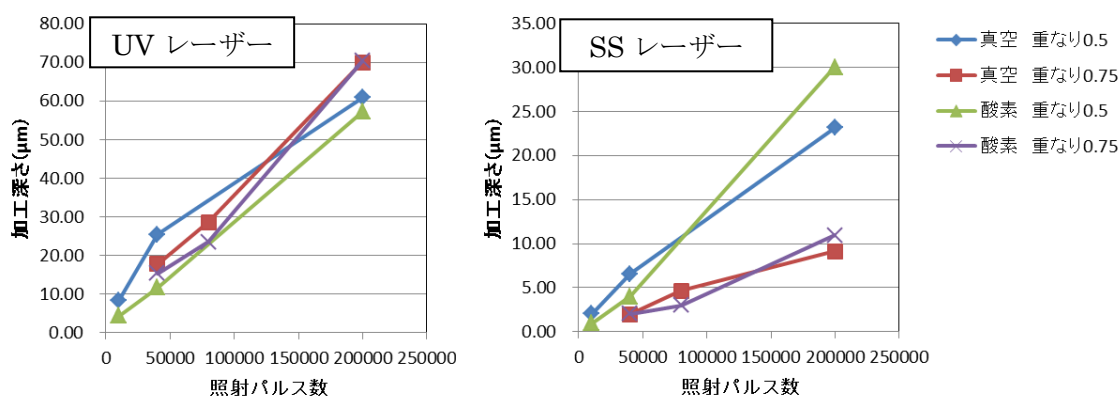


図 2.25. UV レーザーおよび SS レーザーによる加工における加工深さの照射パルス数依存性.

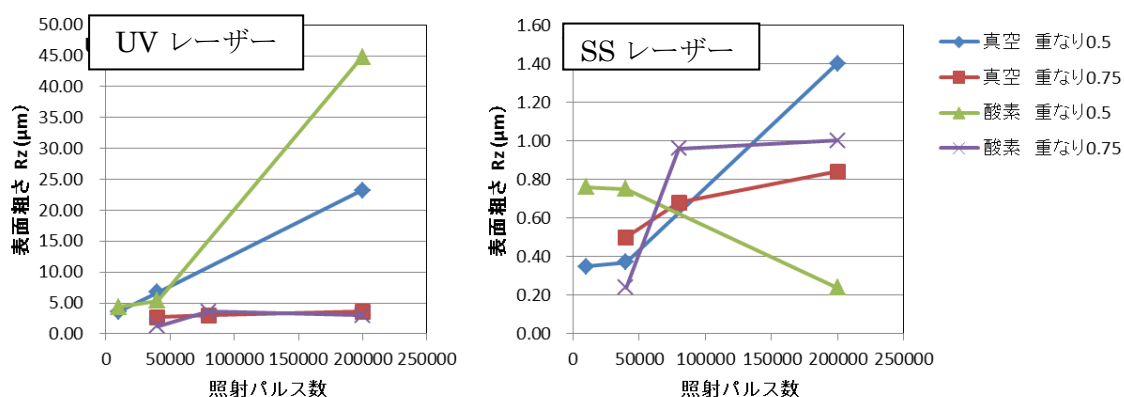


図 2.26. UV レーザーおよび SS レーザーによる加工における加工底面の粗さの照射パルス数依存性.

以上本項についてまとめると、UV レーザーおよび SS レーザーを用いて真空中と低圧酸

素中で GC のレーザー加工を行った。結果として、SS レーザーは UV レーザーよりもデブリの発生が少なく、加工面粗さが小さいということが分かった。しかし加工深さについては UV レーザーよりも小さかった。照射雰囲気制御という点では、低圧酸素がデブリの発生を少なくできることが分かった。

最 3 章 全体総括

これまで、本研究では高速・高精度加工を可能とするために、油静圧軸受を採用し、温度自律補正機能を組み込むことにより、機械振動や温度変化による加工誤差を限りなくゼロに抑えた超精密加工機の開発に取り組んできた。そのために、まずはベースとなる超精密加工機を開発し、その機械の位置決め精度や加工精度について詳しく検証を行った。また同時に振動の低減のために、モデル流路を用いた油圧振動に関する考察も行ってきた。

そして本年は開発した超精密加工機のさらなる精度向上のために、加工機に機能を付与する形で、油圧振動の原因となる渦流の発生を抑制し、振動の発生を抑えるための研究や、省エネを実現するための温度自律補正機能についてその構想と、その際必要になる熱交換器に関して、熱流体シミュレーションを通じて、最適な熱交換器についての考察を行った。また、それらの機能を生かすための独自の加工主軸についても開発を行った。さらに、研究の加速枠として自由平面上に微細形状を加工する能力を付加するために、超精密加工機に SS レーザーを用いたレーザー加工ユニットを搭載した。そして、その加工の精度を検証するとともに、その特性を利用した独自の加工についても研究を行った。

今回の研究開発の結果としては、一章の表 1.1 の項目のうち、加工の溝幅と微細加工の精度については、レーザー加工ユニットでの加工結果から、委託期間中の目標値は達成できたことが確認できた。ただ、振動の低減機構や温調装置について、その実装までは行うことができなかったため、その他の機械の位置決め精度や機械の真直度等は測定を行うことができなかった。各機能が実装でき次第測定を行っていく予定である。

超精密加工機は現状でも高い加工精度を誇っているが、今後、振動の低減機構や温度自律補正機能、独自の加工主軸などが機械に加わることによって、さらに高精度で、かつ省コストの加工ができるようになることが期待される。そうすれば、超精密加工機としては大きな付加価値を持つことになり、経済的な効果が十分に期待できるものである。また、レーザーを利用した超精密加工は、まだまだ発展途上の産業分野であるためまだ多くの可能性があると考えられる。

今後も、各方面の研究者並びに川下企業の方々のご協力を得ながら、業界に貢献できるより良い機械の実現に向けて研究を継続していく。