

平成29年度採択
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「自動車摺動部品の低摩擦化と生産性を両立する精密加工装置の開発」

研究開発成果等報告書

令和2年3月
(事業実施期間 平成29年度～令和元年度)

担当局	中部経済産業局
補助事業者	公益財団法人科学技術交流財団
法認定中小企業者	株式会社タマリ工業

目次(例)

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
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- 【1】高速レーザーテクスチャリング精密加工装置の開発
 - 【1-1】平面加工システムの設計、製作
 - 【1-2】平面加工同期制御の設計、製作
 - 【1-3】円筒加工ユニットの設計、製作
- 【2】高速レーザーテクスチャリング加工技術の開発
 - 【2-1】ディンプルパターンの高速処理技術の開発
 - 【2-2】レーザー加工表面の評価技術の開発
 - 【2-3】円筒面での加工検証

第3章 全体総括

第2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

地球温暖化を防止するためにCO₂排出量削減が重要課題となっている。国際エネルギー機関（IEA）等の予測によれば、自動車は今後30年以上に渡ってその半数以上が動力として内燃機関を使用し、世界の石油エネルギーの約50%を消費するといわれている（図1.1）。各国でCO₂の排出が規制されており年間約4%の削減が必要とされている（図1.2）。また、先進国と発展途上国の190か国以上が参加する地球温暖化対策の新枠組み「パリ協定」が発効され、大気中への温室効果ガス排出を今世紀後半に「実質ゼロ」にする“脱炭素社会”を目指している。

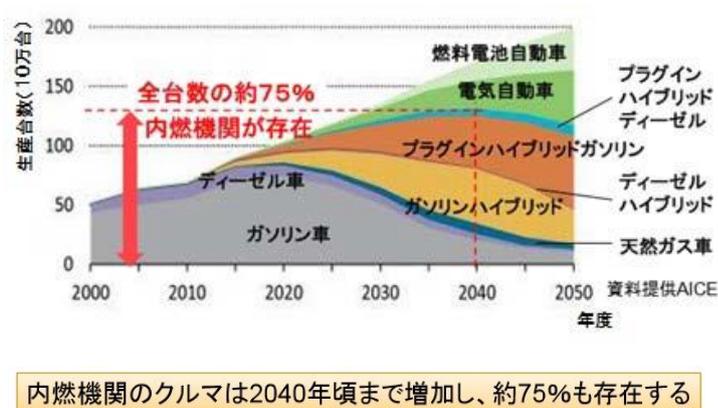


図1.1 自動車の内燃機関構成比

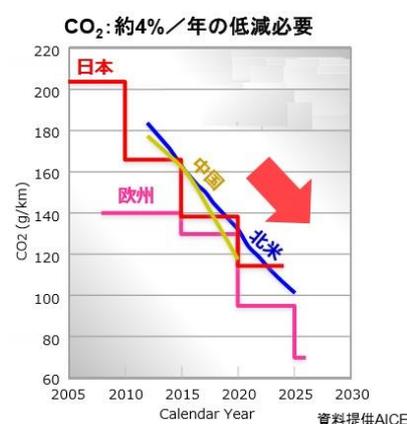


図1.2 自動車のCO₂排気規制

国家プロジェクトとして平成26年に戦略的イノベーションプログラム（SIP）がスタートし、自動車用の内燃機関の熱効率を世界に先駆けて最大50%以上へ飛躍的に向上させる研究が進められている。開発アイテムの一つがエネルギー損失低減であり、摺動部の摩擦損失の低減の研究が取り上げられている。エンジンのシリンダボア等の摺動部表面に超短パルスレーザーによる加工を施し、微細な円形のくぼみ（ディンプル）や溝（ナノ周期構造）を規則的に配列する。このレーザーによるテクスチャリング加工で、潤滑油の保持機能や潤滑膜の荷重負荷能力を向上させ、摩擦特性の向上を図る研究が重要視されている。摩擦係数低減に対するレーザーテクスチャリング形成の効果を図1.3に示す。

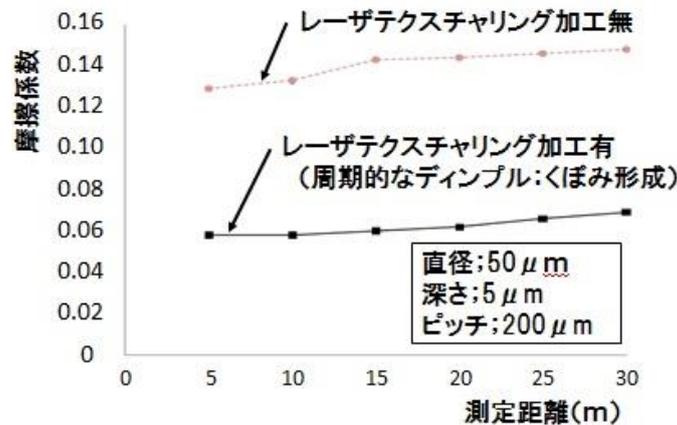


図1. 3 摩擦係数低減：表面テクスチャリング（ディンプル）の効果

通常、レーザー光を材料に当てると、光子が電子を振動させて発熱、熔融、蒸発し、溶接、切断等の加工ができる。しかし、超短パルスのフェムト秒レーザーでは、フェムト秒（1000兆分の1秒）という短時間に数兆ワットという大量の光子が材料に衝突して、電子を弾き出す。残ったプラスのイオンが反発してクーロン爆発して飛び出し、アブレーションという熱の発生しない材料除去加工が可能となる（図1. 4）。

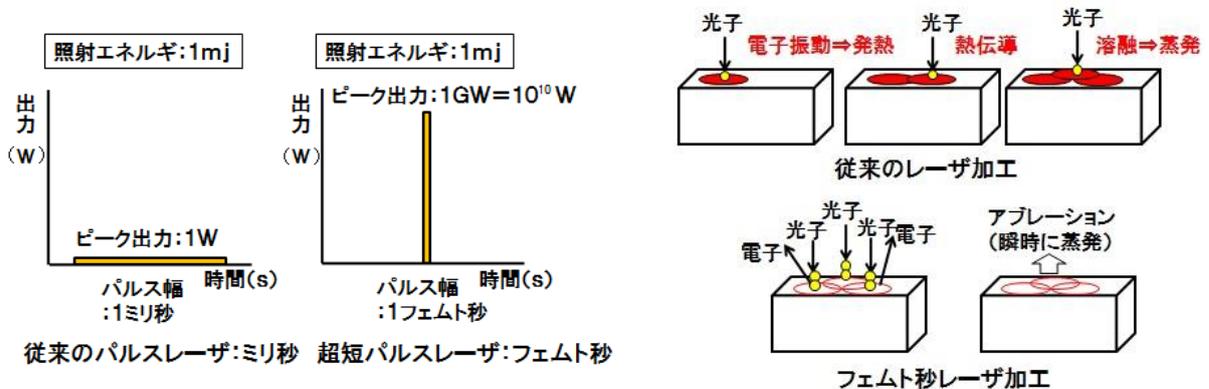


図1. 4 フェムト秒レーザーによる加工

フェムト秒レーザーにより直径数10 μmの微細なディンプルを規則的に配列する（図1. 5）、微細な溝を配列する（図1.6）等の新しいテクスチャリング面の創生が可能となった。熱影響のないレーザー加工として注目を浴び、摩擦係数低減の新技术として種々の適用が検討された。しかし、初期のフェムト秒レーザーは出力が小さいため加工速度が遅く、研究開発に留まり生産適用には至らなかった。

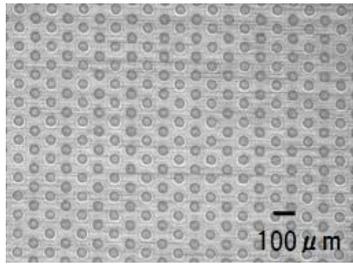


図1. 5 微細ディンプル（くぼみ）加工

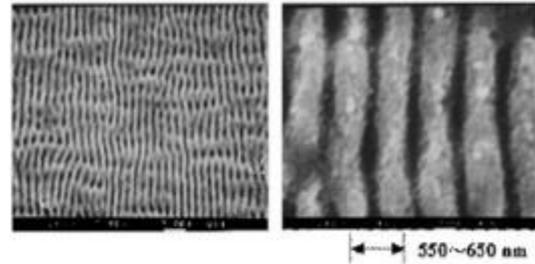


図1. 6 ナノ周期構造（微細溝）

(株)タマリ工業でも川下ユーザの要望で、シリンダボアの試作に対応しているが（図1. 7~8）、レーザを単点照射してディンプル加工した後、1ピッチ送り、また、レーザを単点照射することを繰り返して加工を行っており、直径φ86mmのボアの加工に数時間を要する。この生産性では、とても自動車への適用は不可能である。また、1ボア、数千円というコストも受け入れがたく、川下ユーザからの生産性改善の要望は高い。



図1. 7 試作加工装置
(株)タマリ工業



図1. 8 エンジンシリンダボアのディンプル加工
(株)タマリ工業

(2) 研究目標

「高度化指針において定める高度化目標」

(三) 精密加工に係る技術に関する事項

1 精密加工に係る技術において達成すべき高度化目標

才、生産性・効率化の向上、低コスト化

本研究開発ではポリゴンスキャナーによる超短パルスレーザーの高速走査により、自動車の量産に適用可能な生産性を有する高速レーザーテクスチャリングが可能なレーザー加工装置、加工技術を開発する。

本研究開発における技術的目標値

高度化の技術的目標値を以下の通り設定する。

【1】高速レーザーテクスチャリング精密加工装置の開発

レーザー光と高精度同軸光路設計、同期回転制御により、エンジンのシリンダボア内面のレーザーテクスチャリング加工；直径 $50\mu\text{m}$ 、深さ $5\mu\text{m}$ 、ピッチ $200\mu\text{m}$ を1ボアあたり1分以内の加工速度で再現しうる高速レーザーテクスチャリング精密加工装置を構築する。

【1-1】平面加工システムの設計、製作

走査速度 100m/sec 以上の高回転ポリゴンミラーを使い、高繰り返しフェムト秒レーザーで平面での高速加工を可能とする平面加工システムを設計・製作する。

【1-2】平面加工同期制御の設計、製作

1ボアあたり1分以内のレーザーテクスチャリング加工に相当するレーザー光の走査速度 100m/sec 以上で高速走査する高回転ポリゴンミラーとレーザー光の照射タイミングの同期を $\pm 10\mu\text{m}$ の精度で達成できる制御装置を構築する。

【1-3】円筒加工ユニットの設計、製作

レーザー光と高精度光路設計、同期回転制御により、エンジンのシリンダボア内面のレーザーテクスチャリング加工を1ボアあたり1分以内の加工速度で達成できる円筒加工ユニットを開発し、高速レーザーテクスチャリング精密加工装置として構築する。

【2】高速レーザーテクスチャリング加工技術の開発

1 ボアあたり1分以内の加工速度で、直径50 μm 、深さ5 μm 、ピッチ200 μm のテクスチャリング面が得られることを検証する。

【2-1】ディンプルパターンの高速処理技術の開発

レーザーエネルギー密度、照射繰り返し数、走査速度、ラップ率について、熱による影響を回避しうる加工条件を探索し、1ボアあたり1分以内に相当する加工速度で、ディンプルを規則配列したレーザーテクスチャリング加工；直径50 μm 、深さ5 μm 、ピッチ200 μm を再現する。また、多点照射によるナノ周期構造を、ディンプル加工と同等の高速度で形成し、摩擦係数計測用の試験片を製作する。加えて、医療関係製品等の有機材料の加工に対応するため、樹脂材料に対するUV（紫外）レーザーによるナノ周期構造の形成を実証する。

【2-2】レーザー加工表面の評価技術の開発

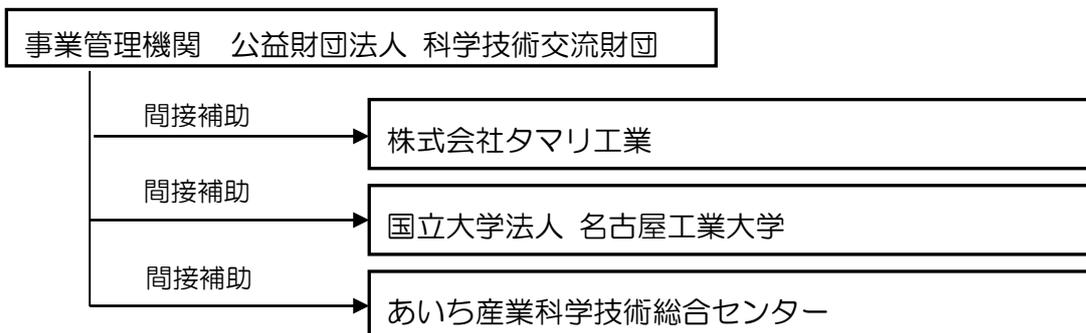
開発したディンプルパターンを有するレーザーテクスチャリング加工面が表面機能として摩擦係数0.06以下であることを検証する。また、ポリゴンスキャナーによる多点照射で高速加工したナノ周期構造を有するレーザーテクスチャリング加工面の、摩擦係数の低減効果を確認する。

【2-3】円筒面での加工検証

円筒内面に平面と同様のディンプルパターンが形成できることを検証する。また、1ボアあたり1分以内の加工速度で、直径50 μm 、深さ5 μm 、ピッチ200 μm のテクスチャリング面が形成できることを検証する。

1-2 研究体制

1-2-1. 履行体制図



1-2-2. 管理員及び研究員

【事業管理機関】公益財団法人 科学技術交流財団

管理員

氏名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
岩田 勇二	専務理事 兼 事務局長	3
山本 昌治	業務部・部長	3
田尻 耕治	業務部研究交流グループ・グループ長 兼科学技術コーディネータ	3
小塚 義成	業務部 科学技術コーディネータ	3
加藤 裕也	業務部 中小企業課長	3

【間接補助事業者】

株式会社タマリ工業

氏名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
三瓶 和久	レーザ技術部 理事	1-1, 1-3, 2-1, 2-3
滝沢 宣人	レーザ技術部 実験・開発グループGL	1-1, 1-3, 2-1, 2-3
小野 秀介	レーザ技術部 実験・開発グループ	2-1, 2-3
畔柳 豊和	システム設計部 機械設計グループ2課GL	1-1, 1-3
畑岡 浩仁	システム設計部 制御設計グループ GL	1-2, 1-3

国立大学法人 名古屋工業大学

氏名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
小野 晋吾	工学研究科 准教授	2-1
糸魚川 文広	工学研究科 教授	2-2
樋口 和夫	工学研究科 特任教授	2-2
前川 寛	工学研究科 准教授	2-2
余 希	工学研究科物理工学専攻 博士後期課程2年	2-1
田中 良樹	工学研究科物理工学専攻 博士後期課程1年	2-1
大谷 潤	工学研究科物理工学専攻 博士前期課程2年	2-1
前田 純希	工学研究科物理工学専攻 博士前期課程2年	2-1
伊藤 広朗	工学研究科物理工学専攻 博士前期課程1年	2-1
加藤 誠也	工学研究科物理工学専攻 博士前期課程1年	2-2
河合 寛幸	工学研究科物理工学専攻 博士前期課程1年	2-1
後藤 和真	工学部 機械工学科4年	2-1
堀内 勇佑	工学部 機械工学科4年	2-1
安永 優輝	工学部 機械工学科4年	2-1

あいち産業科学技術総合センター

氏名	所属・役職	実施内容 (研究項目番号)
杉本 賢一	産業技術センター 金属材料室 主任研究員	2-2
山下 勝也	産業技術センター 金属材料室 主任研究員	2-2
小林 弘明	産業技術センター 金属材料室 主任	2-2
森田 晃一	産業技術センター 金属材料室 技師	2-2

1-3 成果概要

【1-1】平面加工システムの設計、製作（実施機関：株式会社タマリ工業）

高繰返しのフェムト秒レーザと高速光走査が可能なポリゴンスキャナーを搭載し、多点照射によるレーザテクスチャリング加工を可能とする平面加工システムを設計した。

設計図を基に、加工精度を保障するための石定盤をベースとして、繰返し数2MHz、出力100Wのフェムト秒レーザ発振器（Amplitude）、走査速度100m/minのポリゴンスキャナー（Raylase）、レーザ光伝送用光学部品、各軸走査ステージ等を組み込んだ、平面加工システムを構築した。また、本技術の適用領域を拡大するため、有機材料、セラミック等への加工適用を可能にするUV（紫外）レーザが照射可能な設備への機能追加を完了した。

【1-2】平面加工同期制御の設計、製作

規則的なディンプルパターンを形成するため、レーザ光を走査速度100m/sec以上で高速走査する高回転ポリゴンミラーとレーザ光の照射タイミングを $\pm 10\mu\text{m}$ の精度で同期させる同期制御装置の設計、製作を完了した。

【1-3】円筒加工ユニットの設計、製作

円筒内面にレーザを照射する円筒加工ユニットを設計、製作した。被加工物の円筒を回転する回転テーブルと共に、平面加工システムに組み込み、円筒内面を高速レーザテクスチャリング加工する円筒加工システムを構築した。

【2-1】ディンプルパターンの高速処理技術の開発

平面加工システムを使用して、平板上に、ポリゴンスキャナーの走査速度100m/secで高速多点加工を実施し、直径 $50\mu\text{m}$ 、深さ $5\mu\text{m}$ のディンプルをピッチ $200\mu\text{m}$ のパターンで加工可能なことを実証した。そして、同加工条件で摩擦試験用の試験片の製作した。

同様に、平面加工システムを使用して、フルエンス（レーザ光のエネルギー密度）とラップ率をパラメータとして、多点照射によるナノ周期構造の形成状態を調査した。その結果に基づき、レーザ加工条件と照射パターンを選定し、摩擦係数計測用のナノ周期構造試験片を製作した。

また、UVレーザー加工システムを使用して、ポリマー（有機材料）に対する加工技術を検討し、基本波（波長：1000nm）と比較してUVレーザー（波長：343nm）では、低フルエンスで、ナノ周期構造形成が可能であることを確認した。

【2-2】レーザー加工表面の評価技術の開発（実施機関：産業技術センター）

多点照射により加工された直径50 μ m、深さ5 μ m、ピッチ200 μ mのディンプルを形成した試験片を用いて摩擦係数の測定を実施し、目標とする摩擦係数0.06以下、ディンプル無の試験片の1/2を実証した。

また、ポリゴンスキャナーを用いて多点照射による高速度加工でナノ周期構造を形成した試験片の摩擦係数を測定し、ディンプル加工品と同様、摩擦係数の低減が可能であることを実証した。

【2-3】円筒面での加工の検証（実施機関：株式会社タマリ工業）

円筒加工システムを使用して、シリンダボアを模した直径 Φ 86mmの円筒内面に、ポリゴンスキャナーの走査速度100m/secで高速多点加工を実施し、直径50 μ m、深さ5 μ mのディンプルをピッチ200 μ mのパターンで加工可能なことを実証した。

加工時間を計測した結果、円筒1周の加工に5.7分を必要とすることが判明した。回転ステージの送り速度の影響を低減するため10mm幅を一括照射加工して、回転ステージの動作回数を減らすことで、時間短縮を試みたが、加工時間は2.7分と短縮されたが、1分1/1ボアには至らなかった。ポリゴンスキャナーの、多点照射加工の繰り返しタイミングに遅れが発生していることが原因であり、対策方法について協議中である。

従来の単点加工による方式が数時間を必要とすることと比較すると、多点加工により加工時間は2.7分と1/10以下には短縮され、高速加工の成果はえられたが、エンジンのシリンダボアを対象とした1ボア/1分以下の目標は未達となった。

さらなる高速化の探索を進めることと併行して、これまで、調査検討を進めてきたエンジンのシリンダボアに変わる適用対象に対してのサンプル加工を先行して、事業化の検討を進めていく。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

【事業管理機関】

公益財団法人 科学技術交流財団

業務部 中小企業課長 加藤 裕也

〒470-0356 愛知県豊田市八草町秋合1267番1

TEL：0561-76-8326 FAX：0561-21-1651

E-mail：yuya-katou@astf.or.jp

【研究機関】

(株)タマリ工業

レーザ技術部 理事 三瓶 和久

〒445-0802 愛知県西尾市米津町五郎田1-1

TEL：0563-57-1171 FAX：0563-57-4590

E-mail：k-mikmame@tamari.co.jp

国立大学法人 名古屋工業大学

大学院 工学研究科ながれ領域 准教授 小野 晋吾

〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

TEL：052-735-7917 FAX：052-735-7917

E-mail：ono.shingo@nitech.ac.jp

あいち産業科学技術総合センター

産業技術センター 金属材料室 主任研究員 杉本 賢一

〒448-0013 愛知県刈谷市恩田町1丁目157番地1

TEL：0566-22-8033 FAX：0566-22-8033

E-mail：kenichi_sugimoto@pref.aichi.lg.jp

第2章 本論

【1】高速レーザテクスチャリング精密加工装置の開発

【1-1】平面加工システムの設計、製作

平面加工システムではフェムト秒レーザから出射されたシングルモード（ガウシアン分布）のレーザ光を空間伝送して加工レンズに入光して集光し、試料表面に照射してディンプルを加工する。光路の途中にビームエキスパンダーを設置して、途中で一度レーザ光の径を拡大することで集光点でのビーム径を変化させることができる。発振器の出口から470mmの位置にエキスパンダーを配置する構成とした。空間伝送されるガウシアン分布のレーザ光のビームプロファイルは、伝送距離に関わらず保存されるので、レーザ光の集光点を照射位置から離すことによって試料表面でのレーザ光の直径を変化させることで、任意の直径に微調整して、ディンプルを加工することができる。光学機器のレイアウトを図2. 1に示す。

加工精度を保障するための石定盤をベースとして、レーザ発振器、ポリゴンスキャナー、光路計算結果に基づいて選定したビームエキスパンダー等の光学機器を搭載した、平面加工システム全体の構想設計を完了した。平面加工システムの構想設計図を図2. 2に示す。

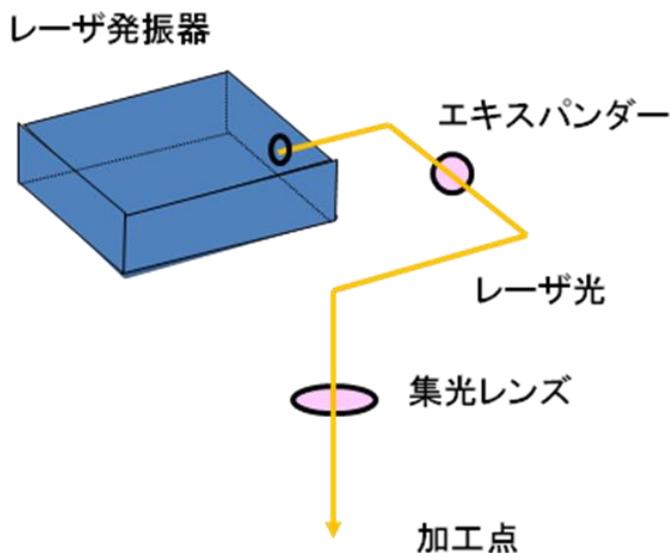


図2. 1 光学機器のレイアウト

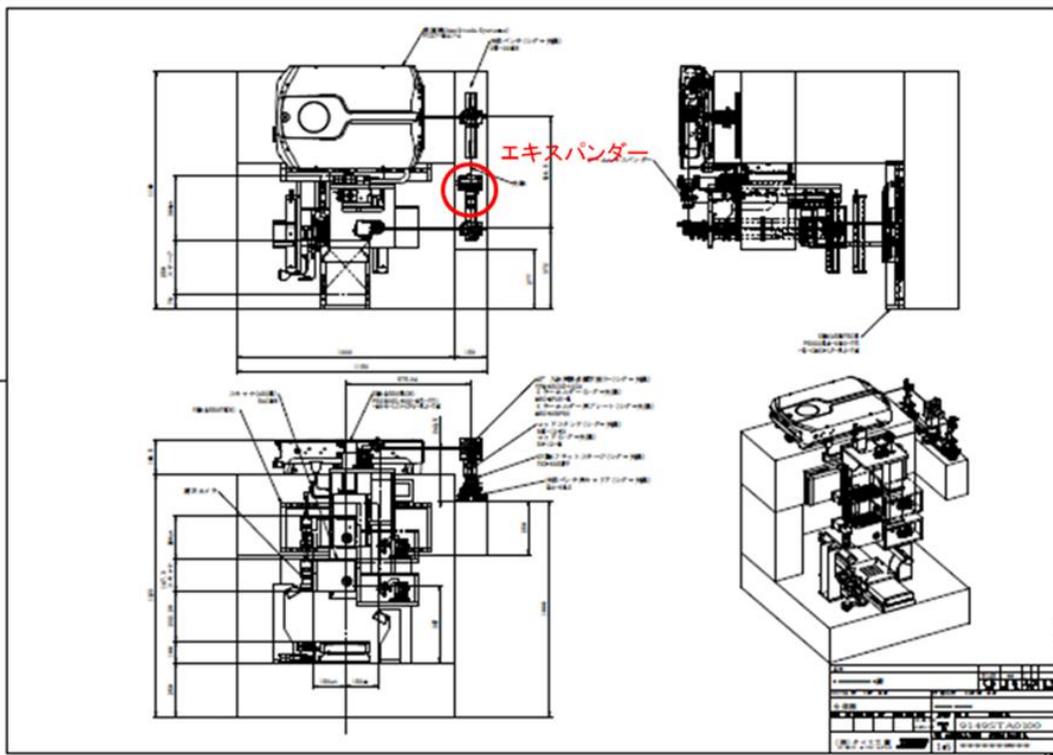


図2. 2 平面加工システム構想設計図

多点照射による高速加工を実現するために選定、導入した高繰り返しフェムト秒レーザーを図2. 3に示す。パルス幅：500 fs、繰り返し数：2MHz、1パルスのエネルギー：50 μ J（2MHz時）である。



図2. 3 高繰り返しフェムト秒レーザー

高繰り返し（2MHz）のフェムト秒レーザー光を高速走査して多点照射加工するために必要なポリゴンスキャナーの仕様は、目標とする直径 $\Phi 86\text{mm}$ 、ストローク86mmのシリンダボアの内面を1ボア、1分でテクスチャリング処理することを前提とすると、①走査速度：100m/sec以上、②焦点距離：100mm以上が必要となる。仕様①②を満足するポリゴンスキャナーとして RAYLASE 社製の UHSS-II-15（図2.4）：最大走査速度100m/sec、焦点距離163mmを選定し、導入した。



図2.4 ポリゴンスキャナー

システムの土台となる石定盤に、繰り返し数2MHz、出力100Wのフェムト秒レーザー発振器（Amplitude）、走査速度100m/minのポリゴンスキャナー（Raylase）、レーザー光伝送用光学部品、各軸走査ステージ等を組み込んだ、平面加工システムを製作した。完成したシステムの外観を図2.5に示す。

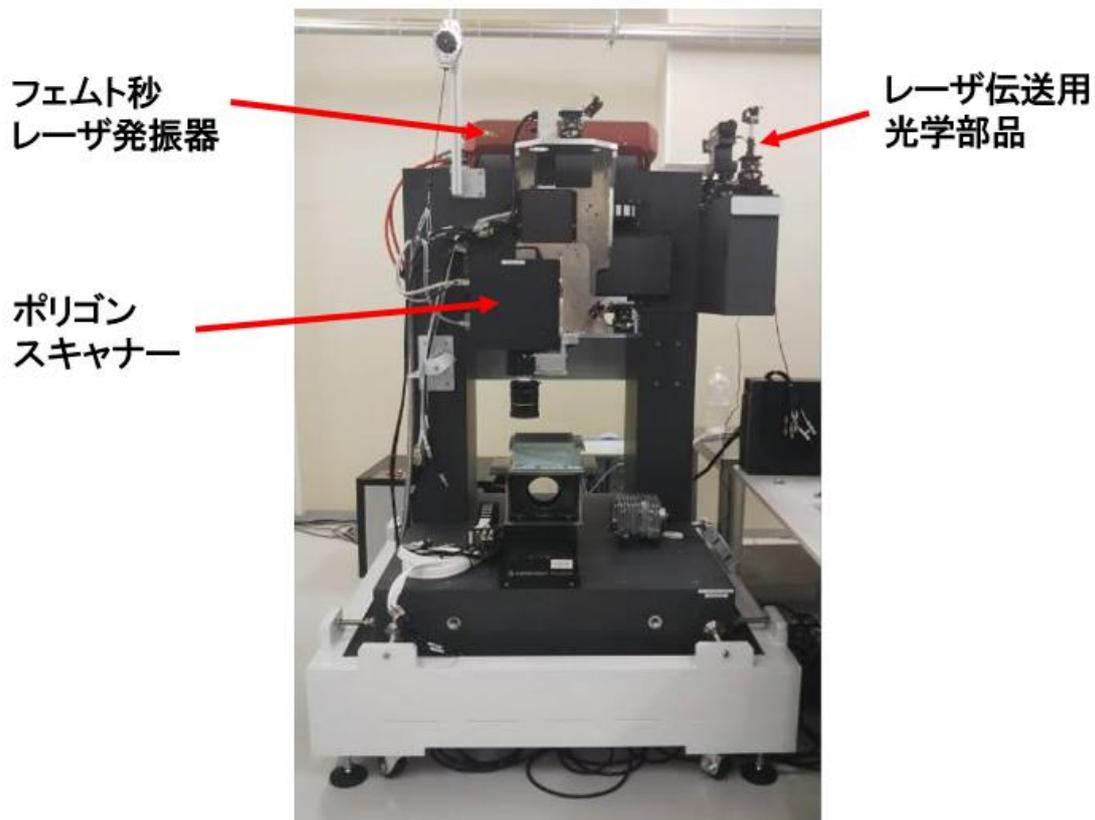


図2. 5 平面加工システム

近年、必要性が増しているポリマー、セラミック等の非金属材料の非熱加工に対応するためUV（紫外）波長のレーザー光での加工を可能とするUV平面加工システムを構築した。

導入した高繰り返しフェムト秒レーザー発振器 Amplitude Tangor の発振波長は基本波と呼ばれる1030nmである。この基本波のレーザー光は波長変換素子を通することによって、第2高調波と呼ばれる1/2の波長：515nmのレーザー光、第3高調波と呼ばれる1/3の波長：343nmのUV（紫外）レーザー光に変換することができる。図2. 6に示すように、導入したレーザー発振器の出射部に、波長変換素子を内蔵したUVモジュールを取り付けて、基本波：1030nmをUV波長：343nmに変換して出射する構成とした。平面加工システムのレーザー発振器とスキャナー、レーザー光伝送部を、UV用に組み替えることで、UV（紫外）レーザー平面加工システムとして構成した。完成したシステムの外観を図2. 7に示す。



図2. 6 発振器へのUVモジュール取付

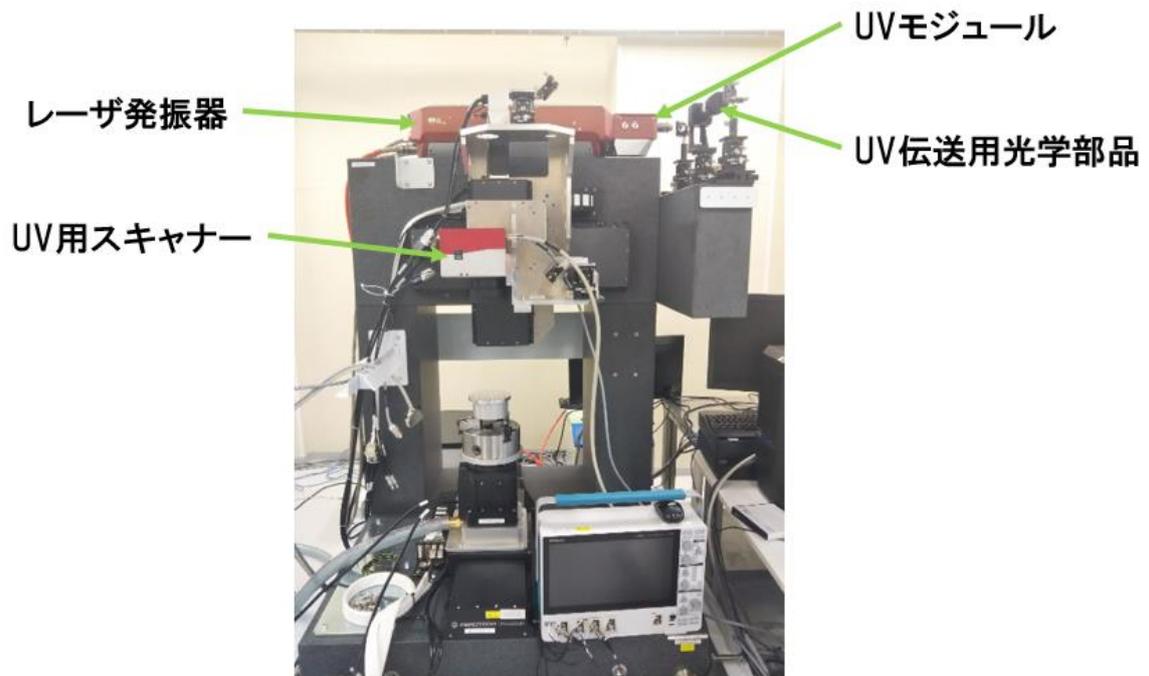


図2. 7 UV（紫外）レーザー平面加工システム外観

【1-2】平面加工同期制御の設計、製作

規則的なディンプルパターンを形成するため、レーザ光を走査速度100m/sec以上で高速走査する高回転ポリゴンミラーと2MHzの高繰り返しフェムト秒レーザ光の照射タイミングを同期させる同期制御装置（図2.8）の設計、製作を完了した。高繰り返しの基本周波数信号を外部から入力して制御することで、多点照射して形成したディンプルの長円化を補正し、円形のディンプルを形成することが可能となった（図2.9）。



図2.8 同期制御装置

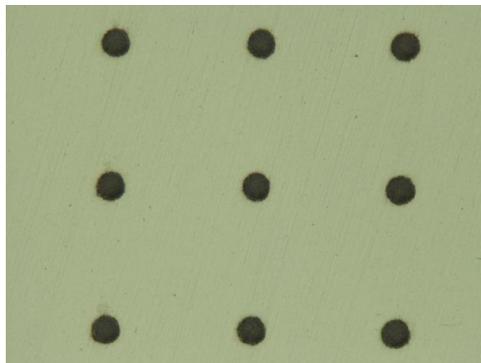


図2.9 同期調整後のディンプル外観写真

【1-3】円筒加工ユニットの設計、製作

直径 $\phi 86\text{mm}$ 、ストローク 86mm のシリンダボア内面のレーザ加工を可能とするコンパクトで高精度な光路構成の円筒加工ユニットの構想設計を完了した。図2. 10、図2. 11に構想設計図を示す。

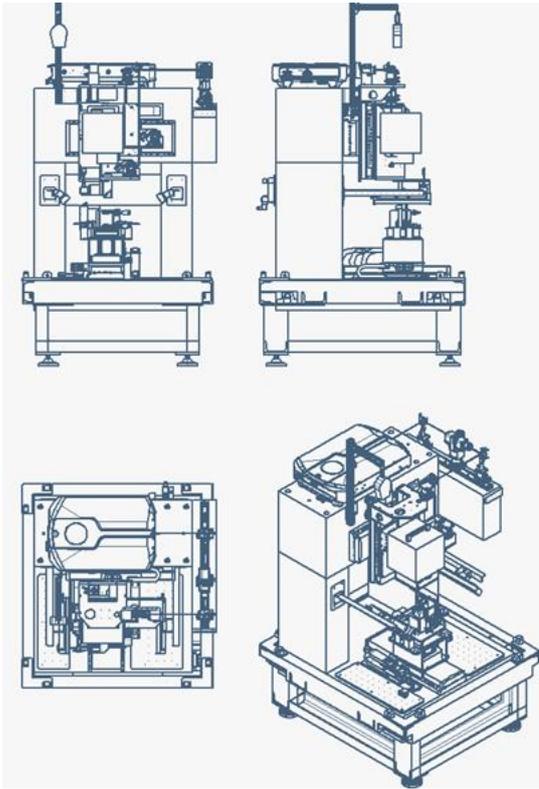


図2. 10 円筒加工システム 組立図

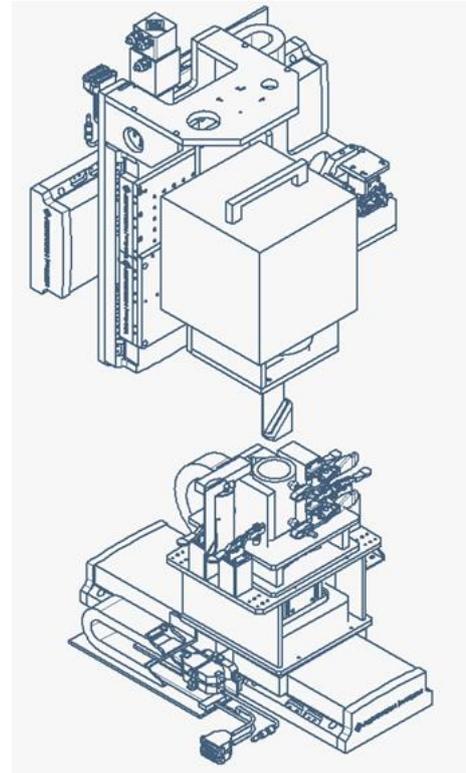


図2. 11 円筒加工ユニット設計図

設計図に基づき、図2. 12に示す、直径 $\phi 86\text{mm}$ 、ストローク 86mm のシリンダボア内面のレーザ加工を可能とする、コンパクトで高精度な光路構成の円筒加工ユニットを製作した。円筒加工ユニットを、シリンダボアを模した円筒を回転する回転テーブルと共に、円筒加工システムの設計図に基づいて組み込み、円筒内面の高速レーザテクスチャリング装置を構築した。システムの外観を図3. 13に示す。



図2. 12 円筒加工ユニット外観図

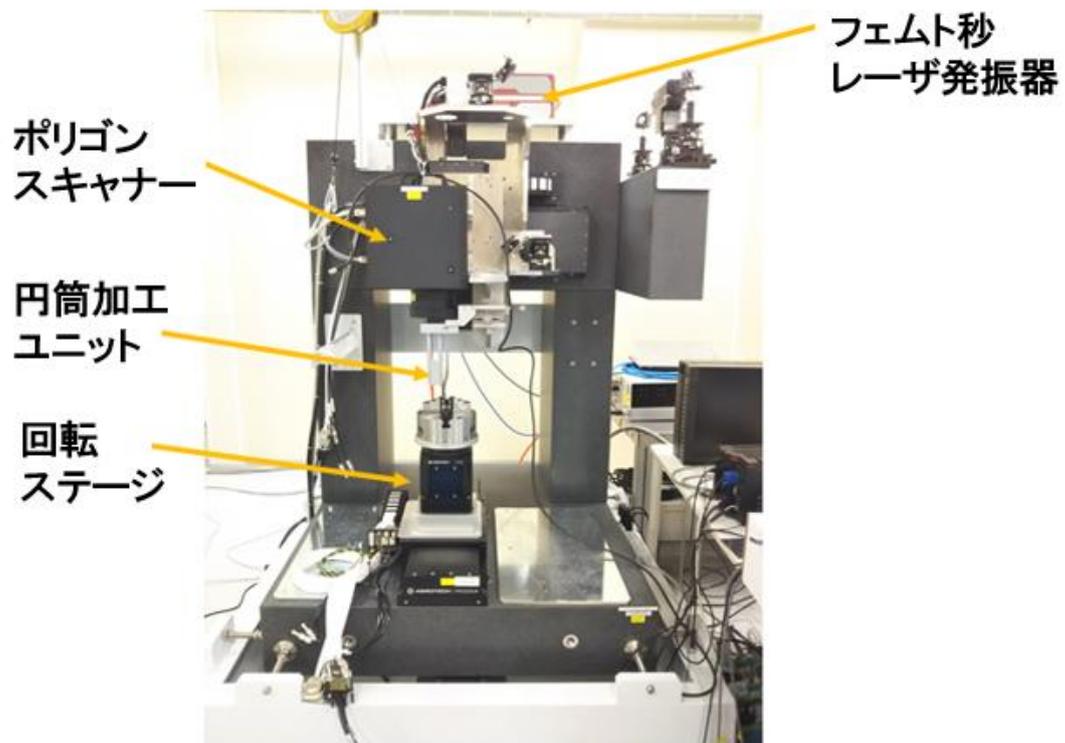


図2. 13 円筒加工システム外観

【2】高速レーザテクスチャリング加工技術の開発

【2-1】ディンプルパターンの高速処理技術の開発

目標としている多点照射によるテクスチャリングパターンを、図2. 14に示す。ディンプル形状は、直径 $50\mu\text{m}$ 、深さ $5\mu\text{m}$ 、ピッチは $200\mu\text{m}$ である。

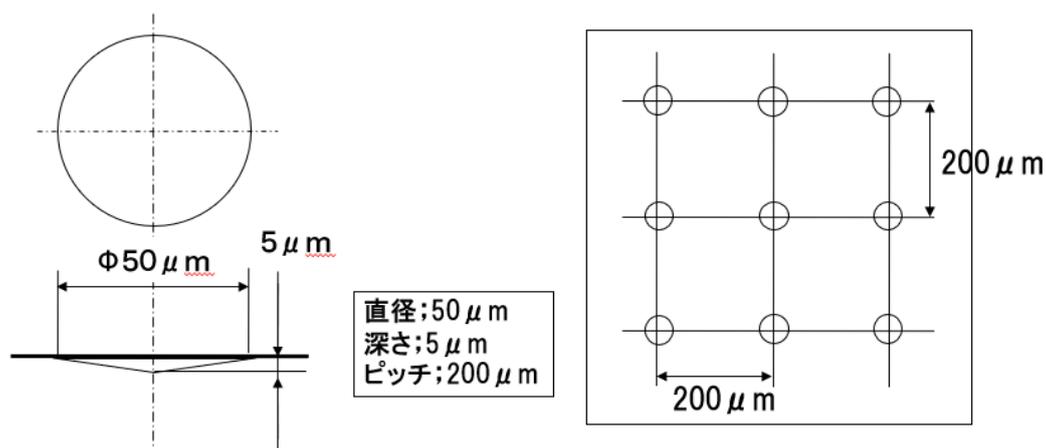


図2. 14 ディンプル形状

評価用のシステムを構築し加工試験を実施した。試験に使用した平面加工システムを図2. 15に示す。目標とするディンプル径 $\Phi 50\mu\text{m}$ を得るため、図2. 16に示すようにビームエキスパンダーの倍率とフォーカス位置を調整することにより、ビームスポット径を $\Phi 50\mu\text{m}$ とした。

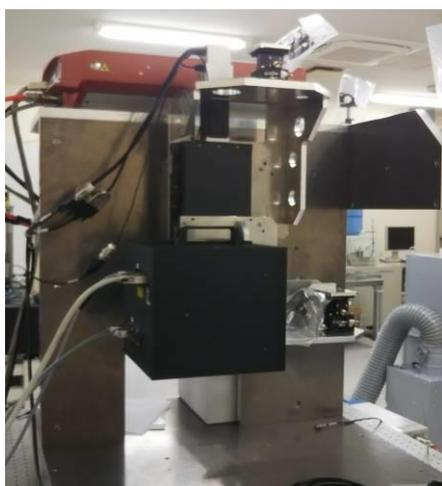


図2. 15 試験用平面加工システム

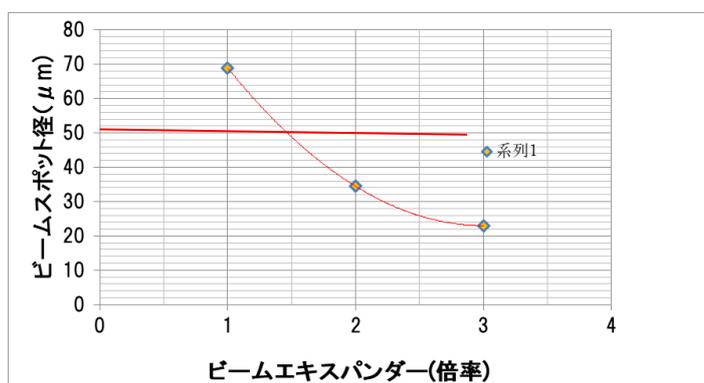


図2. 16 ビームスポット径の調整

目標とするディンプル間ピッチ0.2mmはレーザー光の走査速度と照射繰り返し数により調整することが可能である。目標としている1ボアを1分で加工するためには、ポリゴンスキャナーによるレーザー光の走査速度は100m/secが必要となる。レーザー光の走査速度を100m/secとしたときの、レーザー光の照射繰り返し数とディンプル間ピッチの関係を計算した結果を図2.17に示す。ディンプル間ピッチを0.2mmとするためのレーザー光の照射繰り返し数は500kHzとなる。レーザー光の走査速度を100m/sec、レーザー光の照射繰り返し数は500kHzでレーザーテクスチャリング加工を実施した試験片の外観写真を図2.18に示す。穴間ピッチ0.2mmで加工されていることが確認できた。

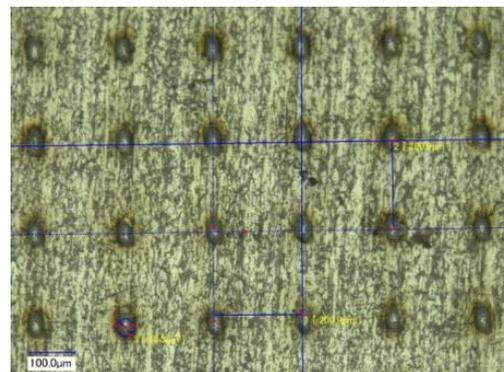
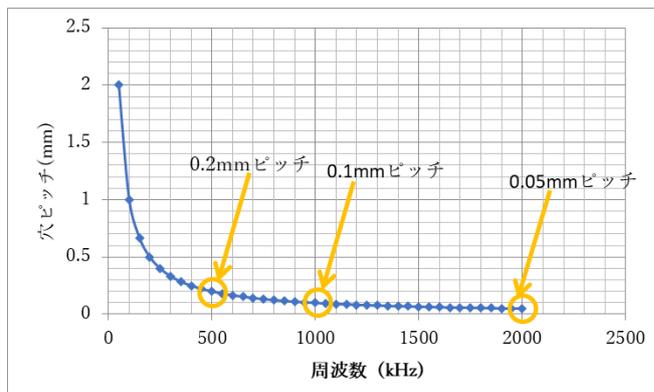


図2.17 繰り返し周波数と穴ピッチ間隔

図2.18 多点加工の試験結果

単点照射加工の実験では、目標とするディンプル深さ5 μ mを加工するためには1ショットのレーザーエネルギー50 μ Jで約60ショットの繰り返し照射が必要であった。同様の加工を試験用の平面加工システムを使用してポリゴンスキャナーによる多点照射加工で実施した。単点照射加工の試験結果を図2.19に多点加工の試験結果を図2.20に示す。多点加工においても、単点照射加工と同等の50ショットでディンプル深さ；5 μ mが得られることを確認することができた。

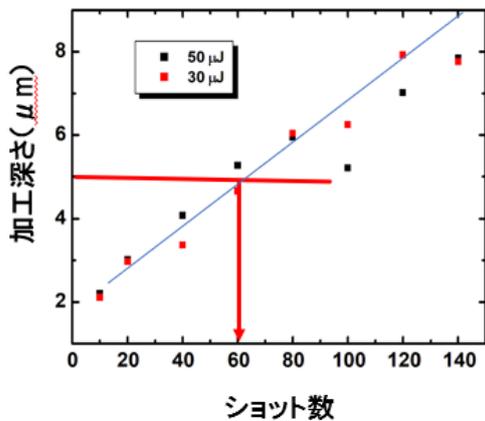


図2. 19 単点照射加工の試験結果

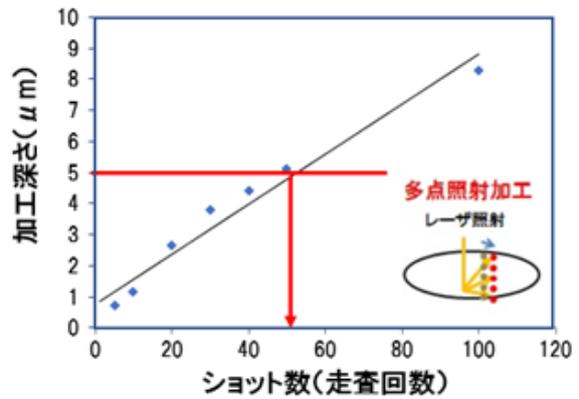


図2. 20 多点加工の試験結果

レーザー照射の繰り返し数が高くなると図2. 21に示すように加工点の直上に発生するプラズマや金属蒸気がレーザー光を吸収してしまい、加工能率が低下したり、加工部位に熱蓄積が生ずる等の問題が発生するといわれている。名古屋工業大学が加工効率に対するレーザー照射の繰り返し数の影響を調査した結果を図2. 22に示す。繰り返し数が2 kHzを超えると加工効率が急激に低下している。

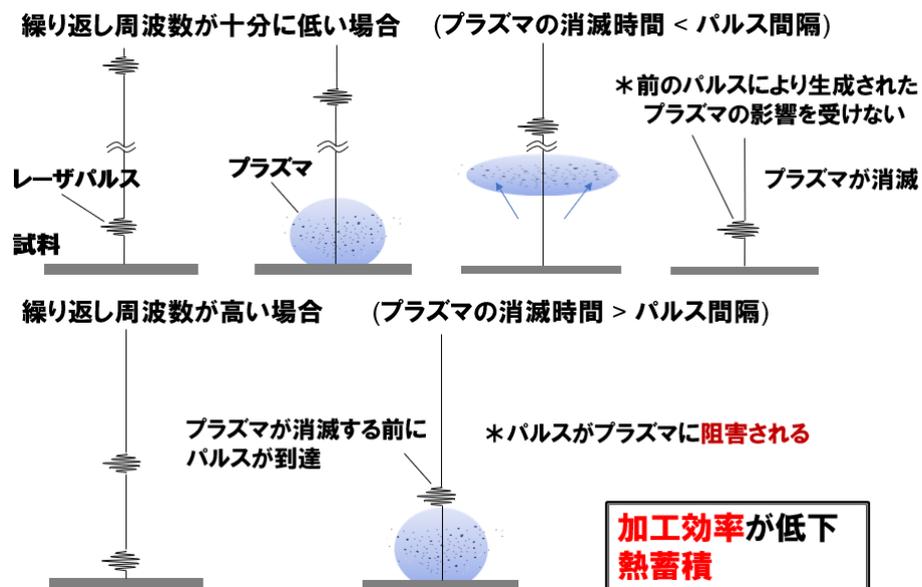


図2. 21 加工効率に対するレーザー照射の繰り返し数の影響

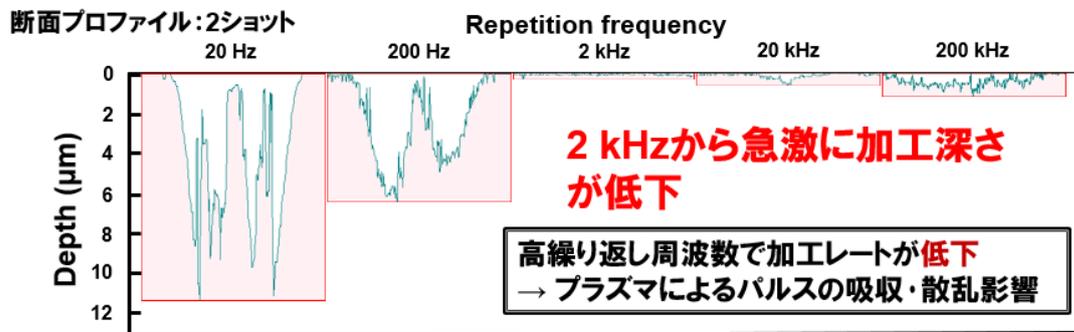
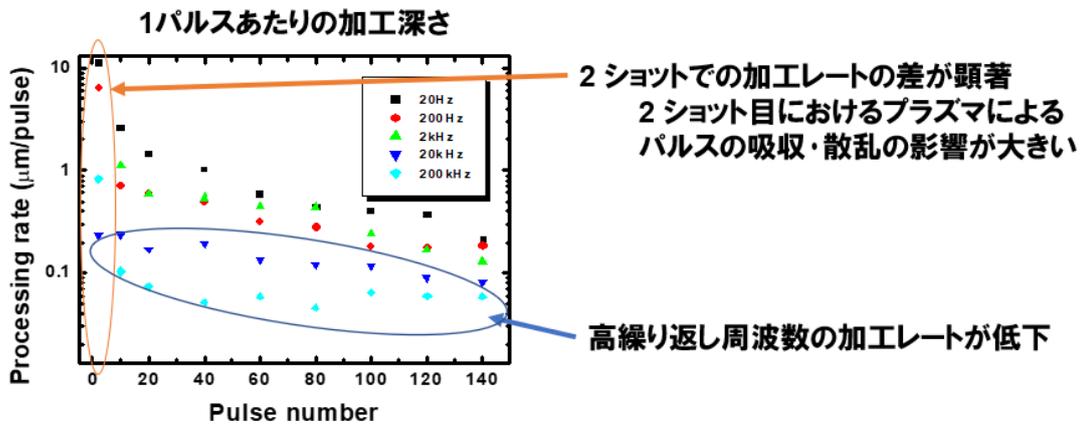


図2. 22 加工効率に対するレーザー照射の繰り返し数の影響調査結果

単点照射と多点照射のレーザーパルス照射間隔を図2. 23に示す。加工効率が低下する繰り返し数が2 kHzのときのレーザーパルスの照射間隔は0.5 msecである。0.5 msecより照射間隔が短くなると加工効率が低下することになる。単点照射では同じ位置でレーザーの照射を繰り返すのでレーザーの照射間隔は0.5 msecである。しかし、多点照射では照射点が移動する。レーザーの照射を繰り返しながら始点から終点まで移動した後、始点に戻り、再度、終点まで移動することを繰り返して加工が進むことになり、同一点での照射を考えると移動時間分だけレーザーの照射間隔に遅延を生じることになる。レーザー光の走査速度：100m/sec,照射の繰り返し数500kHzの場合、レーザーの照射間隔は1 msecである。多点照射の照射間隔1 msecは単点照射で加工効率が低下する時の照射間隔0.5 msecより長いので加工効率の低下は生じていないことになる。

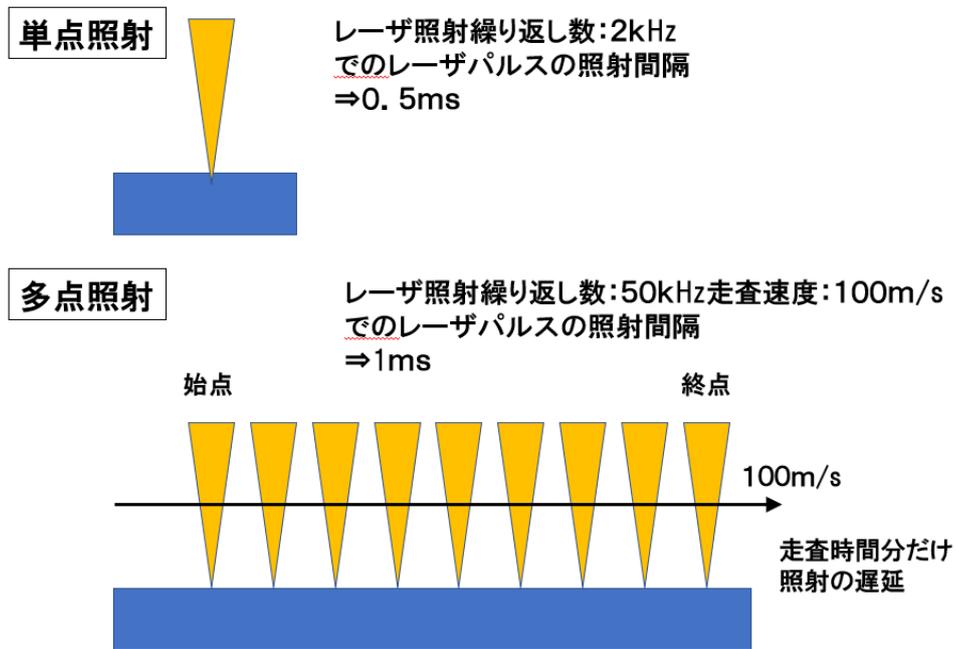


図 2. 23 単点照射と多点照射のレーザーパルス照射間隔

試験結果を基に、摩擦係数計測用試験片を製作した。外観写真を図 2. 23 に、レーザー顕微鏡によるディンプル深さの計測結果を図 2. 24 に示す。

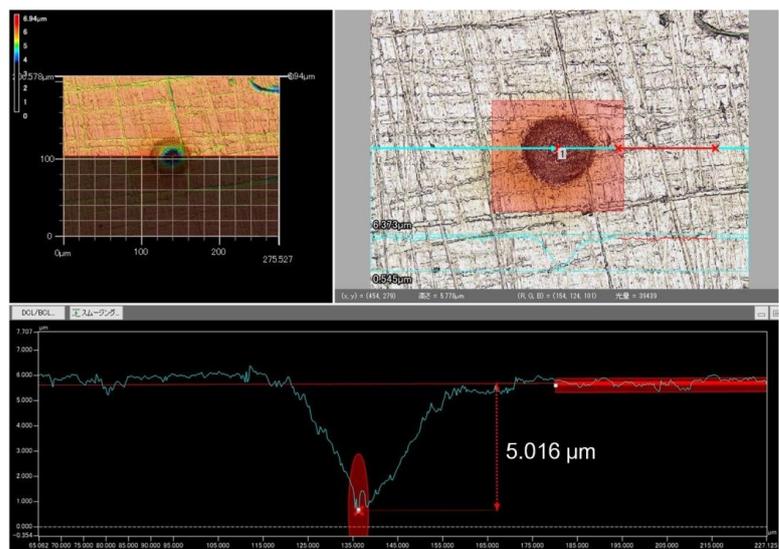
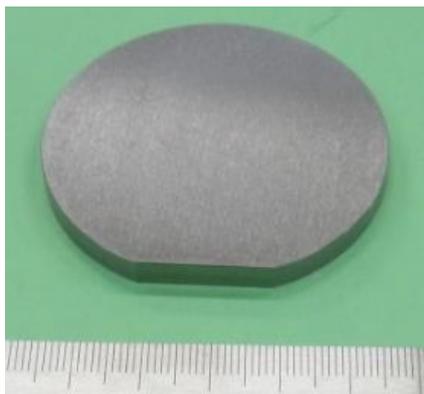


図 2. 23 摩擦試験片外観写真

図 2. 24 ディンプル深さの計測結果

本開発で選定した加工条件におけるフェムト秒レーザーによるテクスチャリング加工が非熱加工であることを実証するデータを採取するため、熱電対とサーモグラフィーを使用して、加工時の試験片の温度計測を実施した。試験装置の構成を図2. 25に示す。

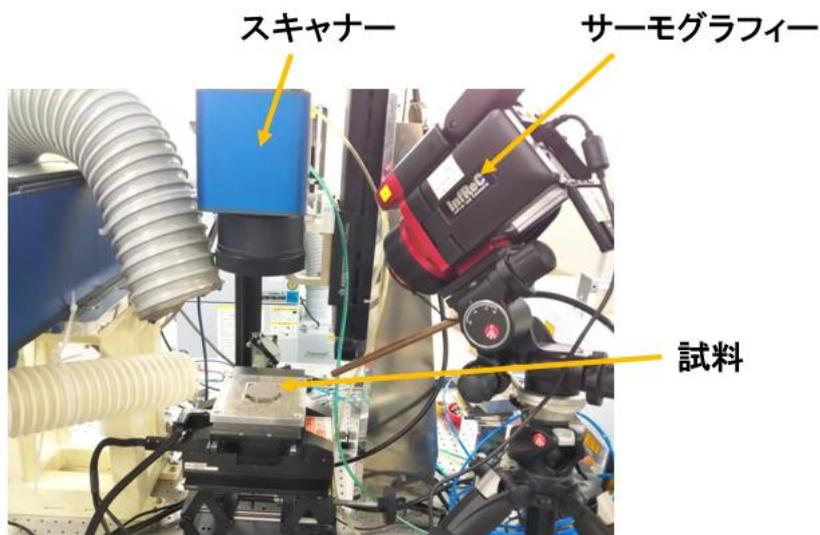


図2. 25 温度計測時の機器構成

熱電対による計測結果を図2. 26に、サーモグラフィーによる計測結果を図2. 27に示す。適正条件でフェムト秒レーザーを照射した時の試験片の温度上昇は 1°C 以下であり、熱影響の生じない非熱加工であることを実証するデータが取得できた。レーザーの照射エネルギーを4倍にすることで試料の温度上昇が認められたが、 3.8°C であり材料の融点が 1400°C と比較すると極めて低い値であった。

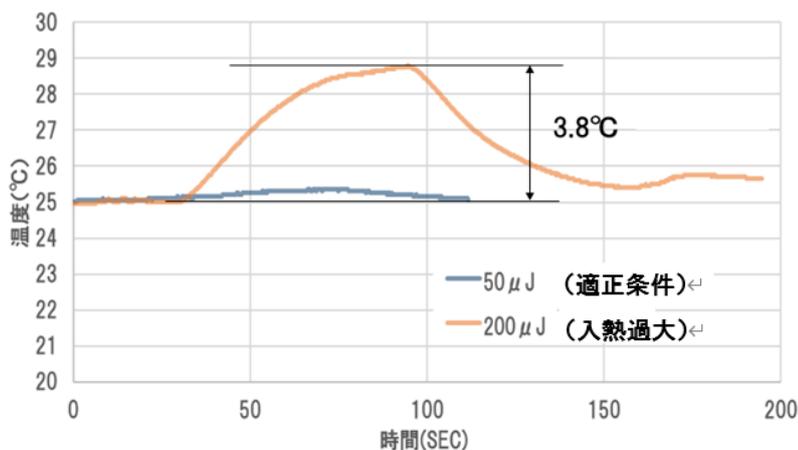


図2. 26 熱電対による温度計測結果

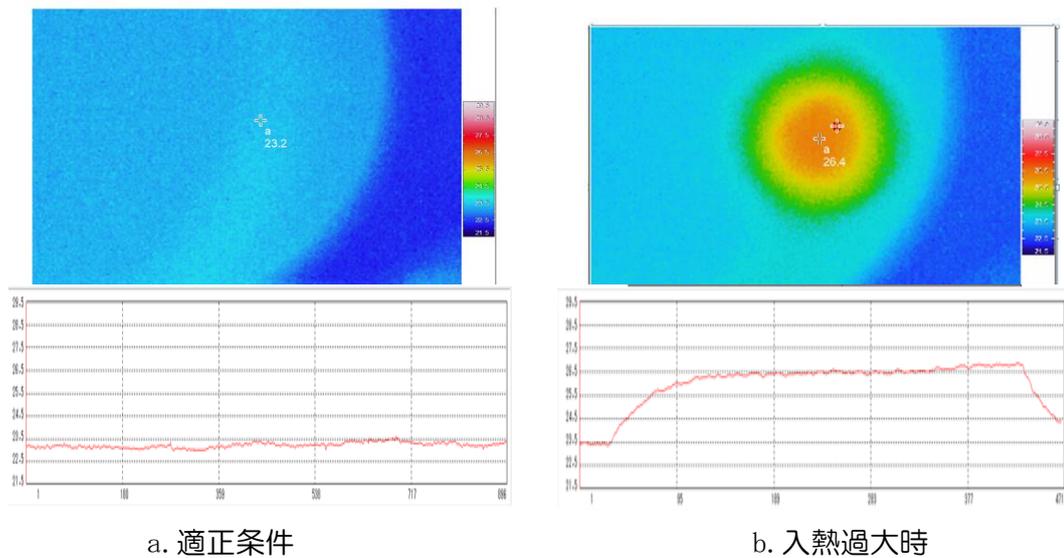


図2. 27 サーモグラフィーによる計測結果

名古屋工業大学では、ディンプルパターンの摩擦低減効果への影響を調査するため、バリエーションとして図2. 28に示すような40、20、10 μm 間隔でディンプルを形成した摩擦試験片を製作し、摺動特性を調査した。調査結果を図2. 29に示す。ディンプルの間隔を小さくした試験片ほどより大きい摩擦低減効果を示しており、ディンプルからのオイルを引き出すことが可能な距離は10 μm 以下であることを見出した。最も間隔の小さい10 μm ピッチでディンプルを作製した試験片において、混合潤滑領域と流体潤滑領域の境界において、およそ0.04の摩擦係数を確認している。また、ディンプル加工を施した試験片において、混合潤滑領域から流体潤滑領域への移行領域がシフトするなど、摺動特性制御の可能であることを確認した。

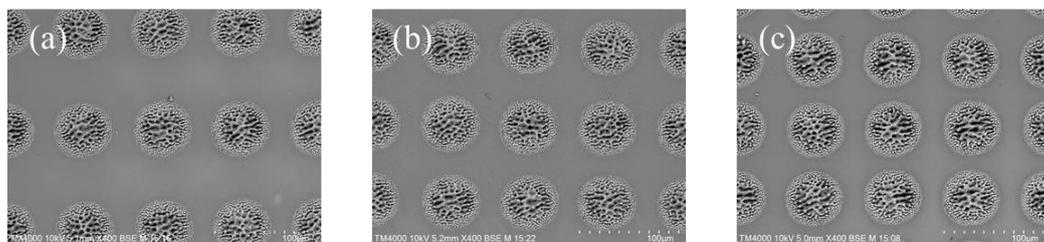


図2. 28 ディンプル間隔(a)40 μm (b)20 μm (c)10 μm の摩擦試験片のSEM像

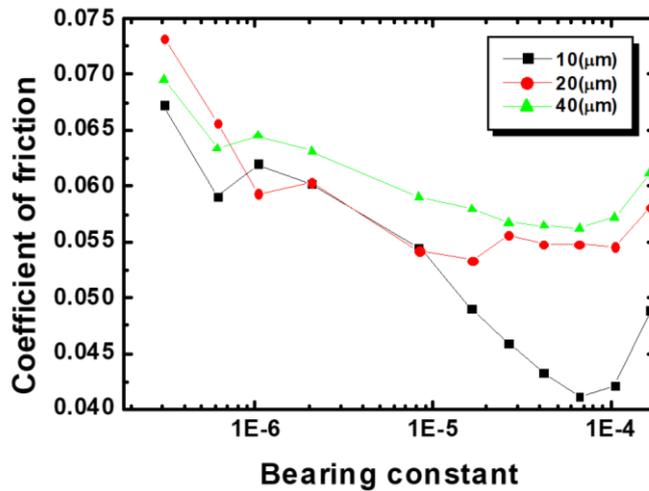


図2. 29 ディンプル間隔 40 μm、20 μm、10 μmの摩擦試験片の摺動特性

超短パルスレーザーを試料に繰り返し照射することによって、波長(1030 nm)に比べて小さい周期間隔の構造が形成される。このようなナノメートルスケールの周期的な微細構造はナノ周期構造 (LIPSS: Laser Induced Periodic Surface Structure) と呼ばれ、アブレーション閾値近傍のフルエンス (レーザー出力密度: J/cm²) のレーザー光を (図2. 24)、複数回照射する (図2. 25) ことで形成されることが明らかにされている。その形成機構は、レーザー光の入射波が散乱波とプラズマ波にパラメトリック崩壊して、干渉することにより、波状の電磁場が生成し、個々の粒子に力を及ぼすことにより生成することがシミュレーションにより明らかにされている (図2. 26)。

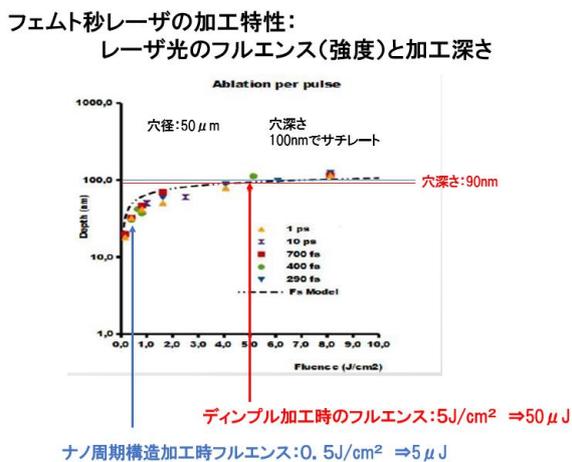


図2. 24 フルエンス: ナノ周期構造

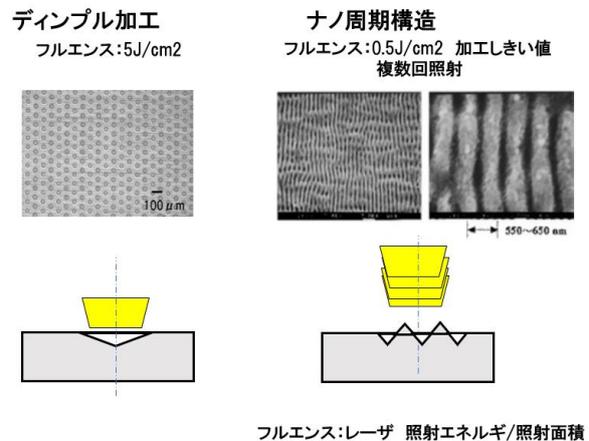


図2. 25 ナノ周期構造の形成

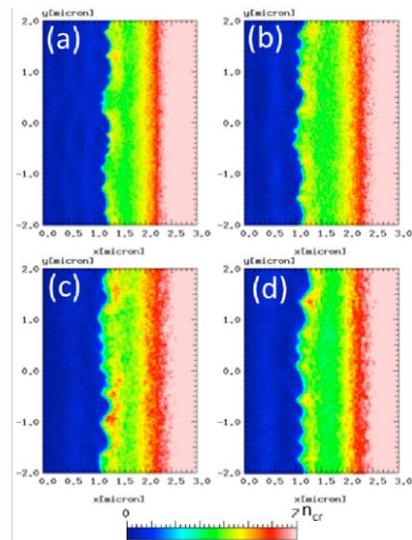
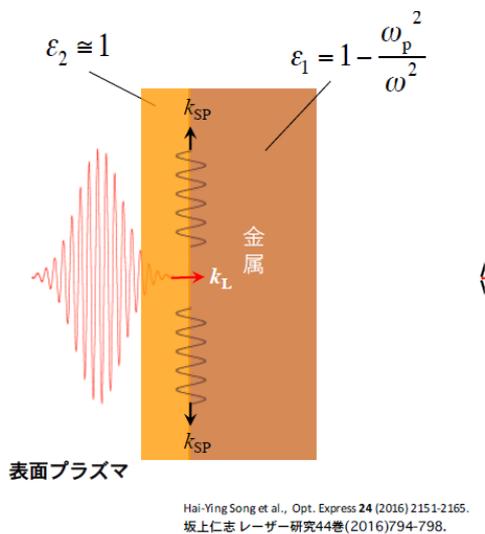


図 4.11 異なるレーザー波長における電子密度分布.
λ_L=(a)600, (b)800, (c)1000, (d)1200nm のもの.

図2. 26 超短パルスレーザーによる周期構造形成に関するシミュレーション研究
名古屋大学大学院 複雑性科学理論研究室 緒方智也

ナノ周期構造を製品に適用するためには、大きな面積にナノ周期構造を形成する必要がある。レーザー光のフルエンス（照射エネルギー密度 J/cm²）とラップ率（%）を加工パラメータとして、レーザー光を走査しながら繰り返し照射することで、大面積領域のナノ周期構造形成を検討した。

レーザー光の照射繰り返し数：200kHzで、フルエンスを0.1～0.7J/cm²、ラップ率を60～95%の範囲で、パラメータとして変化させて試験片を製作し、ナノ周期構造の形成領域を調査した。形成したナノ周期構造のSEM画像を図2.27に示す。ナノ周期構造の形成の有無は、高倍率のレーザー顕微鏡の画像で識別が可能である。また、調査結果として、ナノ周期構造の形成領域を図2.28に示す。フルエンス0.4J/cm²以上、ラップ率80%以上の加工条件でナノ周期構造の形成が可能であることが確認できた。

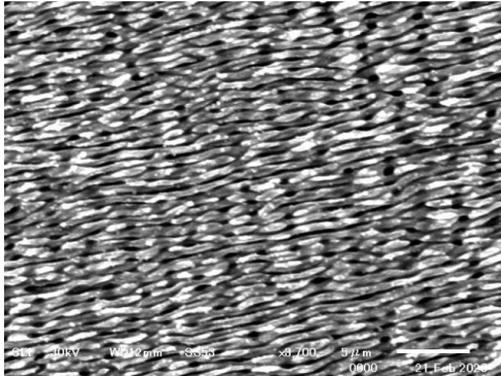


図2. 27 ナノ周期構造 SEM 画像

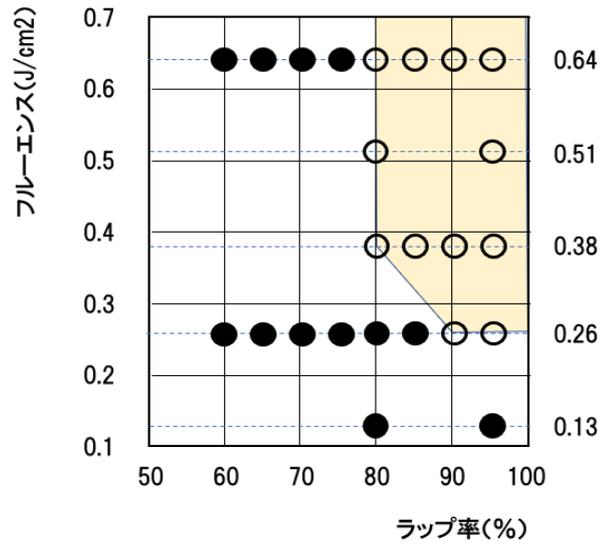


図2. 28 ナノ周期構造形成領域

その結果に基づき、ビーム径 $\phi 50\mu\text{m}$ 、フルエンス $0.47\text{J}/\text{cm}^2$ 、ラップ率 86.7% 、レーザの照射繰り返し 12.5MHz 、走査速度は $100\text{m}/\text{sec}$ の加工条件で、高繰り返し数、高速度でのナノ周期構造形成の可能性を検証した。本条件でナノ周期構造を加工した結果を図2. 29に示す。 12.5MHz の高繰り返し、 $100\text{m}/\text{sec}$ の高速走査で加工しても、従来と同等のナノ周期構造が形成可能であることが確認できた。

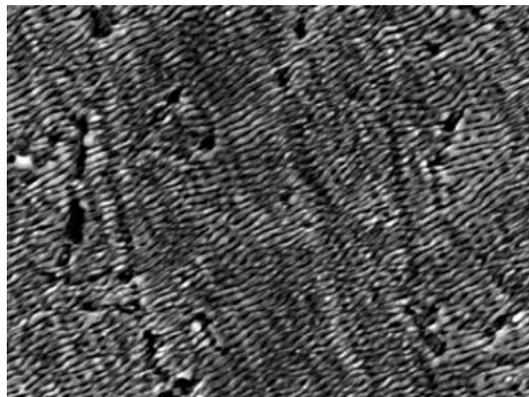
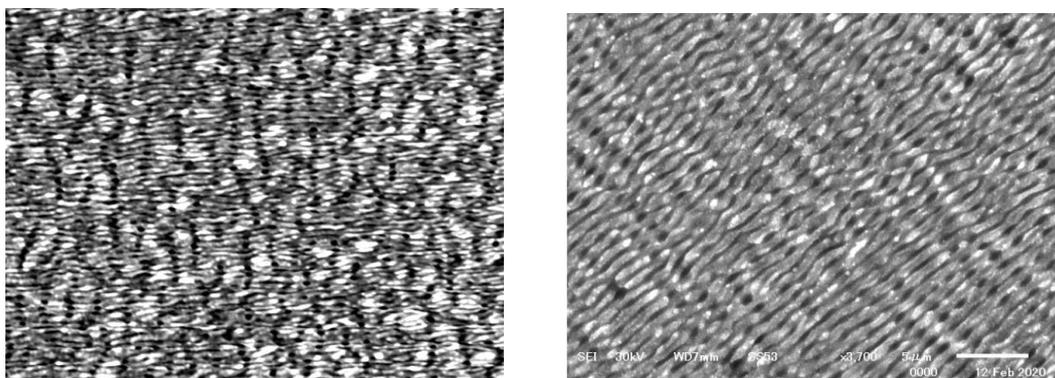


図2. 29 高速 $100\text{m}/\text{sec}$ で加工したナノ周期構造

高速加工したナノ周期構造と、従来の一般的な加工条件（加工速度）で製作したナノ周期構造の摩擦係数を計測して比較するため、摩擦係数計測用試験片を製作した。

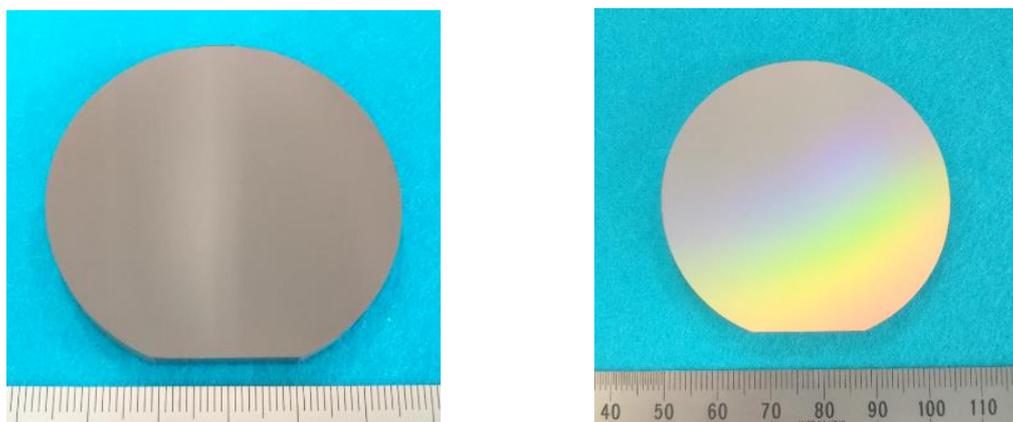
ビーム径 $\Phi 50\mu\text{m}$ 、フルエンス $0.4\text{J}/\text{cm}^2$ 、ラップ率 90% を同一条件として、従来のフェムト秒レーザーでは、レーザーの照射繰り返し数 200kHz で走査速度は $1\text{m}/\text{sec}$ 、高繰り返しフェムト秒レーザーではレーザーの照射繰り返し 10MHz で走査速度は $50\text{m}/\text{sec}$ とした。本条件でナノ周期構造を加工した結果を図2.30に示す。 10MHz の高繰り返し、 $50\text{m}/\text{sec}$ の高速走査で加工しても従来と同等のナノ周期構造が形成可能であることが確認できた。



a. $200\text{kHz}-1\text{m}/\text{sec}$ b. 高速化 $10\text{MHz}-50\text{m}/\text{sec}$

図2.30 高繰り返し-高速走査でのナノ周期構造形成

選定した加工条件にて摩擦係数計測用のナノ周期構造試験片を製作し、摩擦係数の計測試験に供試した。製作した試験片の外観写真を図2.31に示す。



a. $200\text{kHz}-1\text{m}/\text{sec}$ b. 高速化 $10\text{MHz}-50\text{m}/\text{sec}$

図2.31 摩擦係数計測用試験片の外観写真

近年、医療関係部品等の有機材料加工用の紫外レーザーのニーズが高まっている。ポリマーに対して、基本波：波長 $1 \mu\text{m}$ のレーザー光は透過性が高く、ポリマーには吸収されないためナノ周期構造の形成は不可能といわれている。基本波のレーザー光を、1 点に繰り返し照射して、加工パラメータであるフルエンスと照射回数を幅広い範囲で変化させて、ナノ周期構造の形成を試みた。結果を、図 2. 32 に示す。レーザー光のフルエンスを $0.1 \sim 2.6 \text{ J/cm}^2$ 、照射回数を $100 \sim 60,000$ 回の幅広い範囲で変化させても、ナノ周期構造の形成は確認できなかった。

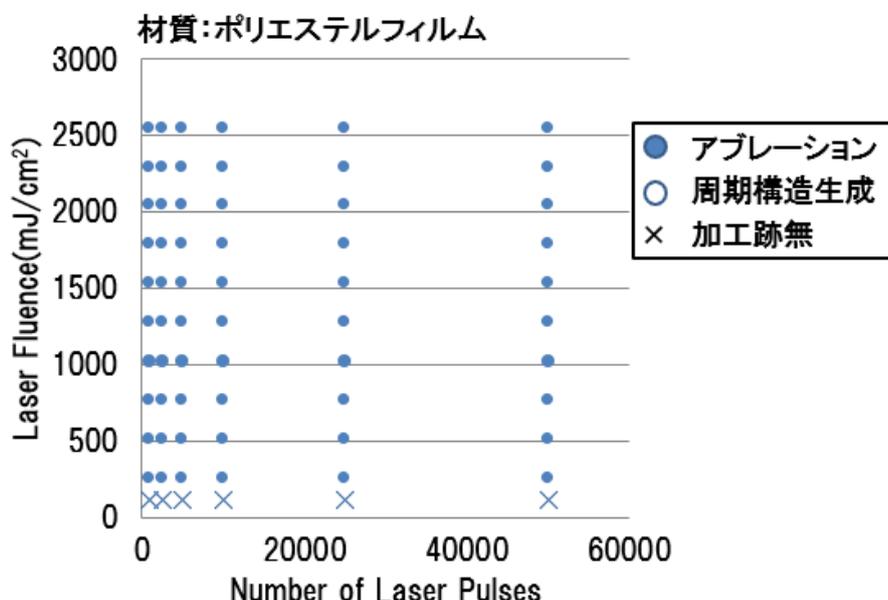


図 2. 32 ナノ周期構造生成範囲 波長： 1030 nm

PC (ポリカーボネート) に UV: 343 nm 波長のレーザーをスポット径 $\phi 153 \mu\text{m}$ 、出力 3.0 W 、周波数 500 kHz で単点照射して、フルエンスと照射回数をパラメータとして、ナノ周期構造の形成範囲を調査した。試験条件については PC のナノ周期構造形成に関して、波長 265 nm のレーザーを使用して、フルエンス: $1.1 \sim 1.6 \text{ mJ/cm}^2$ 、照射回数: $500 \sim 20,000$ 回でナノ周期構造を形成した Esther Reboljar らの論文の試験例を参考にした。試験結果を図 2. 33 に示す。フルエンス: 8.35 mJ/cm^2 では $175,000 \text{ Shot}$ 以上、フルエンス: 8.7 mJ/

cm²では、照射回数50,000 Shot以上でナノ周期構造の形成が確認された。波長1030nmのレーザー照射に対して、UV波長：343nmではナノ周期構造が形成されることは確認できた。しかし、金属材料へのナノ周期構造形成条件範囲、フルエンス400mJ/cm²以上、ラップ率80%（照射回数5回相当）以上に比べて、フルエンスは約1/40と低いが、照射回数が30,000倍と非常に多く、形成範囲も非常に狭いことが解った。ナノ周期構造のレーザー顕微鏡画像を図2.34に示す。形成されたナノ周期構造は、曲線状で、周期の幅も微妙に変化しており、レーザー光の干渉が生じその影響が加わっているものと推察され、検討を継続して進めていく計画である。

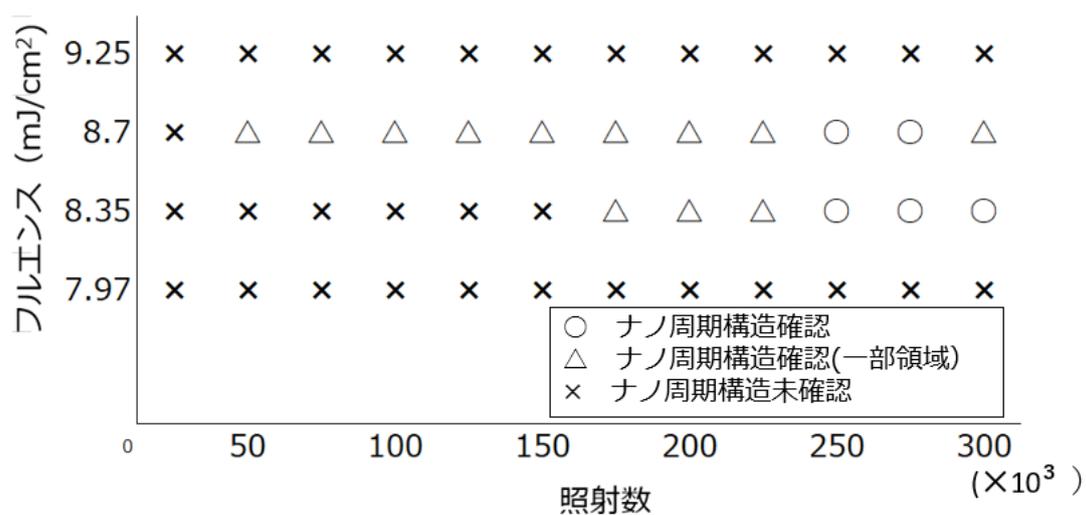


図2.33 UV（紫外）レーザーによるPCのナノ周期構造形成範囲

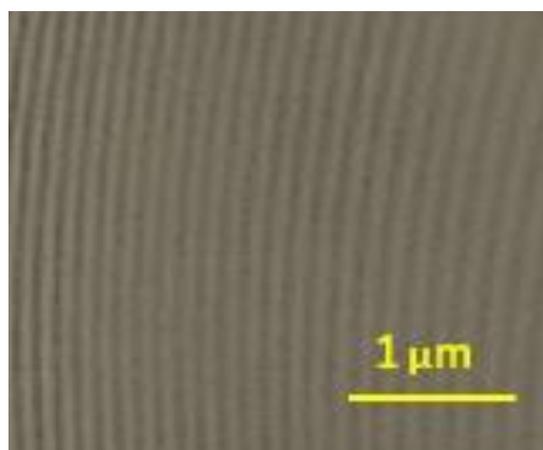


図2.34 紫外レーザーによるPCのナノ周期構造のレーザー顕微鏡画像

次に、二次電池に用いられる電極箔の非熱切断加工について検討した。燃料電池に用いられる電極箔は切断面に異物や炭化物の付着、熱影響による材質の変質があると電池の効率が落ちる等不具合を生じる。電極は、銅箔やアルミ箔を使用し、表面を樹脂等でコーティングすることで形成されている。

これまでは高出力のシングルモードファイバーレーザーを用いて切断を行っていたが、樹脂成分のコンタミの付着や、熱影響部の炭化が電極の性能を落としていることが問題となっている（図2.35）。



図2.35. ファイバーレーザーによる切断（熱加工）

波長1030nmのフェムト秒であっても熱影響が生じるため、樹脂や銅、アルミ材にも吸収率が高いUVレーザーにて切断試験を行った。使用したレンズはF108.3（レーザー集光径：20 μm）、F174.7（レーザー集光径：31 μm）、F250.3（レーザー集光径：44.4 μm）である。切断試験の結果、F174.7、F250.3のレンズでは切断できない、あるいは切断できても熱影響が大きくなることが確認された。一方、レーザー集光径の小さい、F108.3のレンズでは熱影響部が非常に少なく、きれいな切断が可能なが確認された（図2.36）。

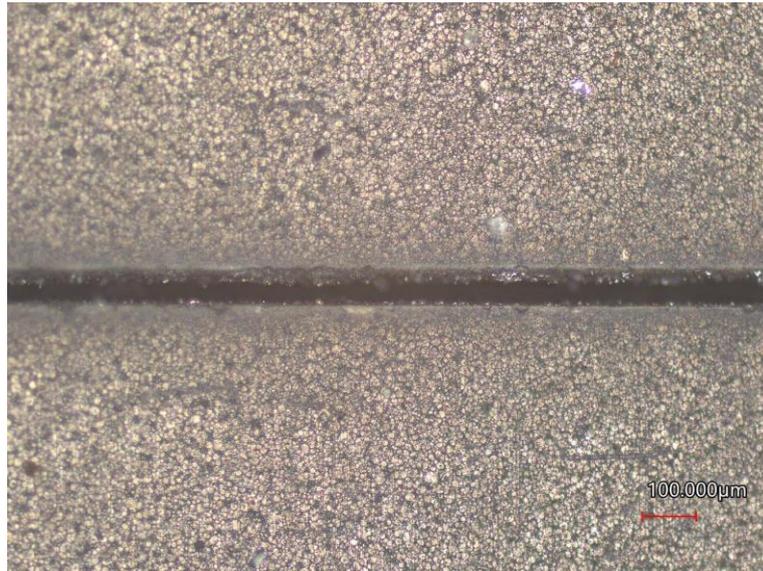


図2. 36. UVフェムト秒レーザー：F108.3による切断（非熱加工）

シーズ技術の探索

名古屋工業大学では、摩擦係数低減以外に超短パルスレーザーを用いて表面テクスチャリング処理を行った各種材料に対して、反射防止機能・吸撥水機能・放熱効果について調査、検討するための表面加工技術の検討を行った。

図2. 37は反射防止機能調査のための、アスペクト比の異なる3つの試験片の断面SEM像とそれらの遠赤外領域での反射特性を示している。作製した加工機は、非常に高い出力の超短パルスレーザーを備えていることから、従来不可能であった高アスペクト比を持つ溝加工を可能にした。この結果、高精度で、高アスペクトな溝加工を材料表面に多数施すことで、遠赤外光の反射防止効果を材料表面に付与することができる。図2. 37に示すように、より高アスペクト比の試験片は、試験片界面における屈折率変化率をよりなだらかにすることができるため、広帯域な反射防止特性を示しており、従来よりも高性能な反射防止構造の形成が可能であることを証明した。

これらのサンプルは、ガウシアンビームを用いた溝加工で形成される断面形状をそのまま利用したものであるが、さらに機械的強度が強く、かつ高性能な反射防止特性を有する溝構造加工のため、多段階、もしくは、フレキシブルな断面形状の形成を試みた。その結果、4種類の断面の形成に成功し、高周波3次元電磁界解析を用いた反射防止特性予測結果が

ら、反射防止帯域、反射防止効率などの反射防止特性の制御が実現可能であることを示した。さらに、石英などの透明材料の多段階溝構造の作製も試みた。これらの結果は、本プロジェクトにおいて構築するレーザ加工機を用いた表面処理において、加工断面形状の自由なデザインが可能であることを示しており、反射防止効果以外への応用も期待できる。

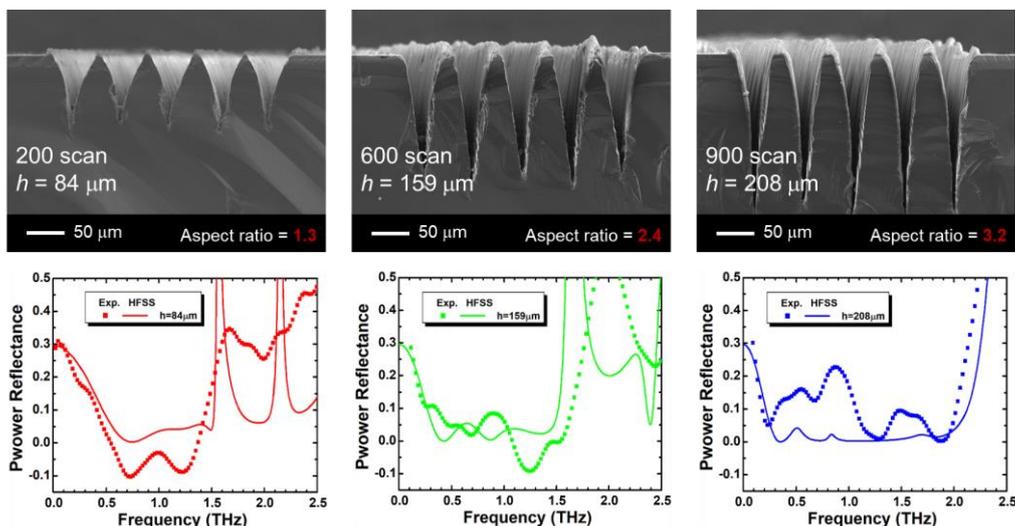


図2. 37 試験片の断面 SEM 像とそれらの遠赤外領域での反射特性。
 反射特性の実線は高周波 3 次元電磁界解析による計算値を、■は測定値を示す。

次に、我々は、セラミクスに対して超短パルスレーザ照射を行い、数十マイクロメートルサイズの構造を形成することに成功した。この処理を施した表面は、ロータス効果を示し、図2. 38の通り超撥水状態となることを確認している。

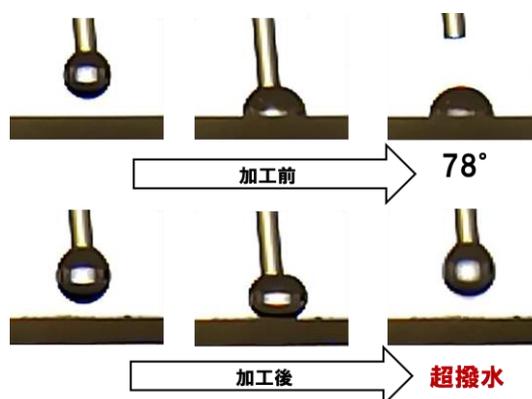


図2. 38 未処理のセラミクス（上図）、および、溶融・凝集処理を施したセラミクス表面（下図）での撥水特性。処理を施すことで、超撥水状態を示す。

材料の放熱効果を高めるためには、体積当たりの表面積を増やすため、溝加工処理が効果的である。この観点から、超短パルスレーザーによるナノ周期溝構造は、非常に高い効果を得られるが、あまりに構造が小さいと電界集中効果が起こりなどして、構造が壊れてしまう。そこで、実際の使用に耐えうるマイクロメートルサイズの溝形成を試みた。ここまでに述べた表面処理は、どれもレンズで集光したレーザービームを照射する手法であるが、この手法で溝加工を行う際、ビームの集光サイズを小さくするほど、走査可能範囲も小さくなるため、10マイクロメートルを下回るサイズの溝加工を大面積に施すことが難しくなる。そこで、我々は図2. 39に示すように、プリズムを用いたレーザー光干渉法による溝加工を行った。バイプリズムの左右を通り抜けたレーザービームは屈折し、加工面上で重なるとともに、光路差による干渉を起こし、光強度の強い部分と弱い部分が交互に加工面上に現れる。さらに、シリンドリカルレンズによって、縦方向にのみレーザービームを集光することで、光強度の強い部分が加工閾値を超えるパワー密度を作り出す調整した。今回は、底角10度の石英プリズムを用いており、6マイクロメートルおきに、溝加工ができるように設定している。図2. 40は実際に加工した周期溝構造のSEM像であり、2マイクロメートルの深さで加工できている。加工条件によっては、ナノ周期溝構造も形成されており、これらの構造の放熱効果を検証する。

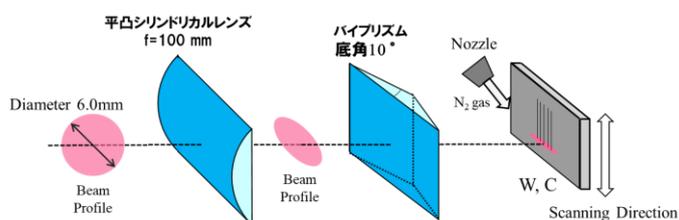


図2. 39 プリズムを用いたレーザー光干渉による溝加工

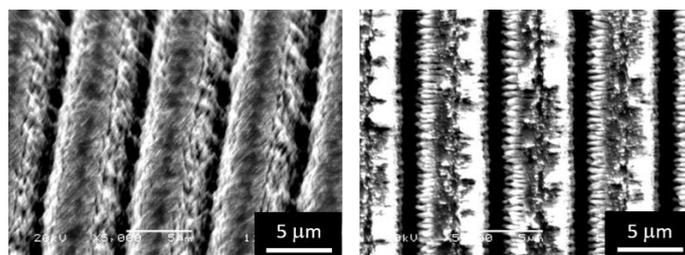


図2. 40 レーザ光干渉によって作製した溝構造

【2-2】レーザ加工表面の評価技術の開発

摩擦試験には、高千穂精機(株)製TRI-S50W(図2.41)を用い、リングオンディスク法(図2.42)により、摩擦係数を測定した。データはグラフテック(株)製データログGL840-WVを用いて、リングにかける荷重及びリング・ディスク間の摩擦力により生じるトルクを取得した。



図2.41 摩擦試験器及びデータログ

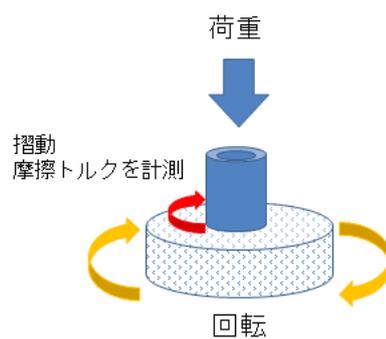


図2.42 摩擦摩耗試験(リング・オン・ディスク法)

使用するディスク及びリングを図2. 43及び図2. 44に示す。接触面の表面粗さは $Ra=0.01$ 程度のもの及び $Ra=0.025$ 程度（図2. 45）のものを用いた。

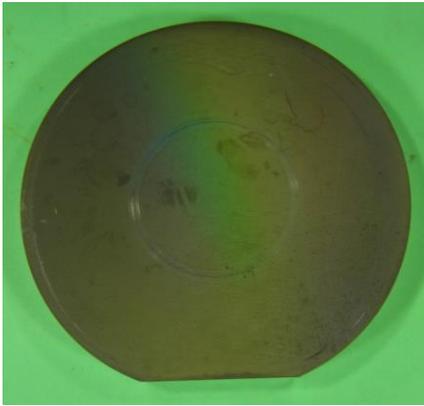


図2. 43 摩擦試験用ディスク



図2. 44 摩擦試験用リング

多点照射により加工された直径 $50\mu\text{m}$ 、深さ $5\mu\text{m}$ 、ピッチ $200\mu\text{m}$ のディンプルを形成した試験片を用いて摩擦係数の測定を実施し、従来の単点加工により作製した試験片と比較した。結果を図2. 45に示す。未処理の試験片の摩擦係数が 0.08 を超えたのに対し、ディンプルを加工した試験片はおよそ 0.05 となり、目標とした 0.06 以下を示した。単点照射加工と多点照射加工の摩擦係数は、ほぼ同じ値を示した。

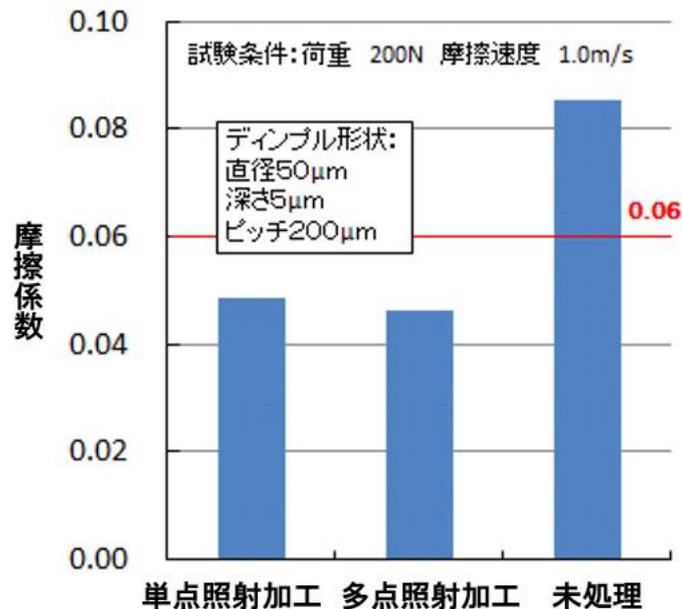


図2. 45 摩擦係数比較

ポリゴンスキャナーによる多点照射で高速加工したナノ周期構造試験片を用いて摩擦係数の測定を実施し、その低減効果を検証した。接触面の表面粗さは $Ra=0.01$ 程度のもので及び $Ra=0.025$ 程度（図2.46）のものを用いた。

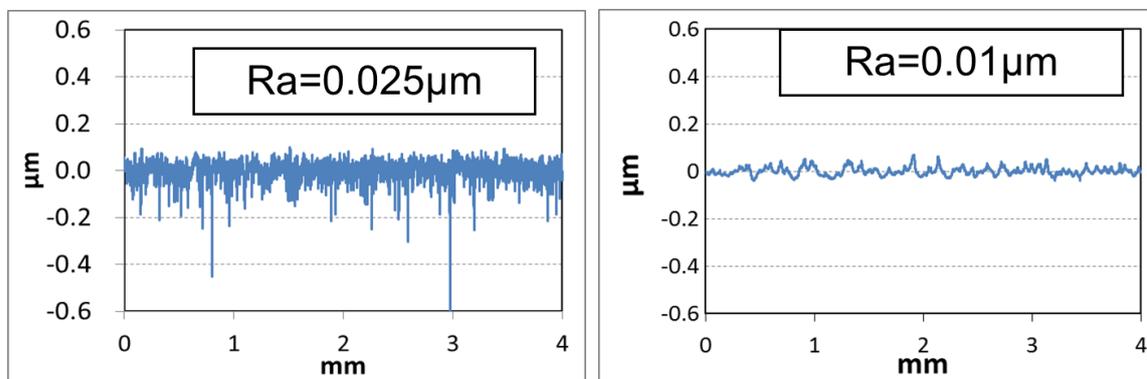


図2.46 ディスクの表面の状態

ナノ周期構造加工の摩擦係数低減効果を評価するために同加工のあり／なしのそれぞれのディスクについて同様の試験を行った。また、摩擦係数は接触面の表面粗さに影響を受けるので、 $Ra=0.01$ 及び $Ra=0.025$ のディスクについてそれぞれナノ周期構造加工の効果を評価した。

摩擦係数の測定は以下のとおり行った。ここで、温度一定にした潤滑油を供給することにより試験温度を制御した。摩擦係数の測定は、リング及びディスクを摩擦試験器に装着し、図2.47に示すよう、リングに荷重をかけた状態でディスクを回転させ、リングに生じる摩擦力を測定した。ここで、リングにかける荷重は100Nに固定し、ディスクの回転速度を変化させ、この時生じるトルクの変化を測定した。トルクを検出するロードセルのブランク値を相殺するために、ディスクを正回転及び逆回転の両方で同様の測定を行い、その平均のトルクから、摩擦係数を計算した。測定条件は表3.1のとおりである。潤滑油の粘度は、JIS K2283（2000）の方法により求めた動粘度及びその温度における密度から計算した。

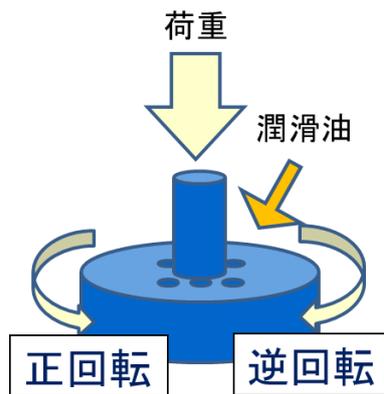


図2. 47 リングオンディスク試験

表3. 1 試験条件

使用機器	高千穂精機(株)製 TRI-S-50W
荷重 F/N	100N
潤滑油	アイシン精機製 AFW+ 粘度 (η / mPa·s) 48.3 (at28°C)
潤滑油流量	~400g/min
試験温度	28±1°C (潤滑油の温度を 30°Cに制御)
リング	内径 20mm、外径 25.6mm →平均半径 11.5mm 1.5mm 幅のスリット 4 か所あり →接触面積 1.84cm ²
ディスク回転速度 V/ms ⁻¹	0.10~1.36m/s (81~1130rpm)
データ取得	20ms 間隔で、荷重及びトルクを取得

生じたトルクの時間変化を図2. 48に示す。得られたトルクから各回転速度における摩擦係数を計算した。

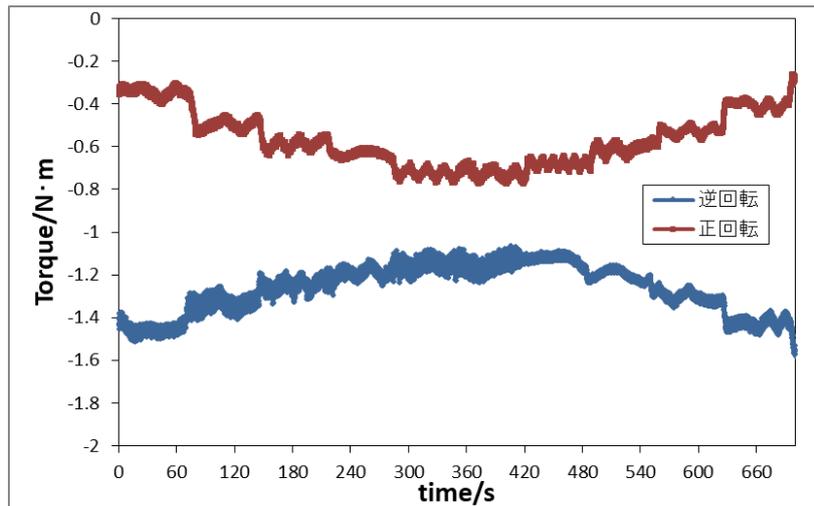


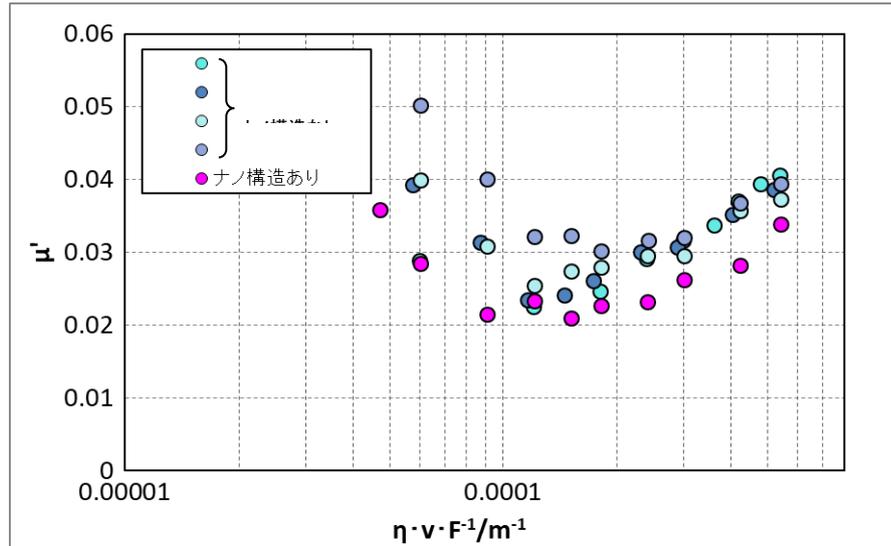
図2. 48 摩擦測定（トルクの時間変化）

ディスク Ra=0.01 μm ナノ周期構造加工なしを使用

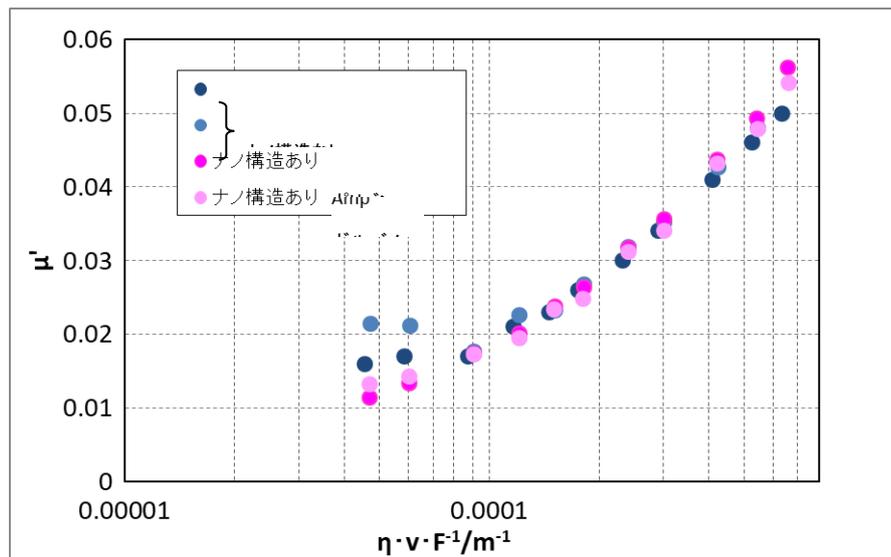
ディスク回転速度 1.13m/s→0.10m/s→1.36m/s

測定結果をストライベック線図に表すと図2. 49のようになる。大きい速度領域（グラフ右側）ではリング・ディスク間は油膜により完全に隔離された状態（流体潤滑）となり、摩擦係数は潤滑油の粘性に大きく影響を受けている。また、速度が小さくなると摩擦係数が極小となり、さらに速度が小さくなると、摩擦係数は再び大きくなる傾向を示している。これは、速度が小さくなることにより、油膜が薄くなりリングとディスクが部分的に接触する状態（混合潤滑）に移行していることを示している。Ra=0.01 のディスクに比べ Ra=0.025 がより大きい速度領域で混合潤滑に移行することは、表面粗さが大きいと比較的厚い油膜でもリングとディスクが接触するためと考えられる。

Ra=0.01、Ra=0.025 いずれもナノ周期構造加工したものは加工のないものに比べ流体潤滑の領域が拡大することがわかり、摩耗による損失低減に寄与できる可能性が示された。また、混合潤滑となる領域においては摩擦係数が低減する効果が確認できた。



表面粗さ $Ra = 0.025$



表面粗さ $Ra = 0.01$

図2.49 ストライバック線図

【2-3】円筒面での加工検証

円筒加工ユニットと制御装置を組み込んで構築した円筒加工システムを使用して、円筒の内面を多点照射により、ディンプルパターン加工した試験片を製作し、ディンプルの形状、直径： $\Phi 50\mu\text{m}$ 、深さ： $5\mu\text{m}$ 、ピッチ： $200\mu\text{m}$ と、1分/1ボア以内での加工の高速化の可能性を検証した。

図2. 50にシリンダボアを模した円筒試験片の外観写真を、図2. 51に円筒試験片を取り付けて加工中の、円筒加工システムの外観写真を示す。円筒加工ユニットと制御装置を組み込んだ円筒加工システムを使用して、円筒の内面に多点照射によるディンプルパターンを加工し、ディンプル形状確認用の試験片を製作した。レーザーの照射条件はレーザービーム径： $\Phi 50\mu\text{m}$ 、照射エネルギー： 50mJ 、照射回数： 60Shot である。



図2. 50 円筒試験片

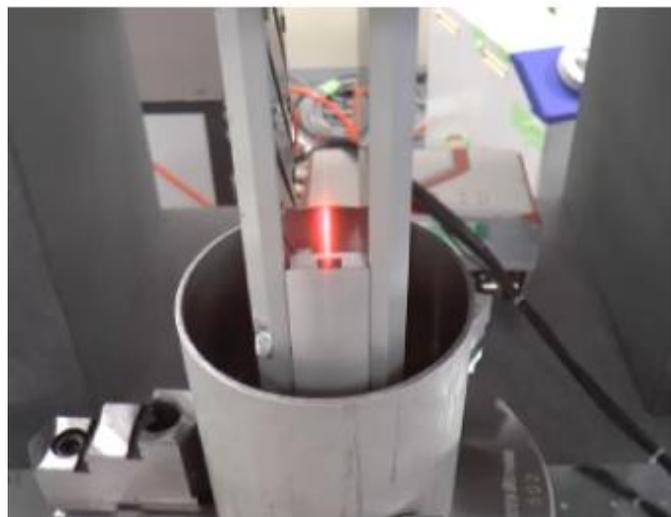


図2. 51 円筒加工中のシステム

ディンプルパターンの顕微鏡画像を図2. 52に示す。規則的な配列で加工されていることが判る。図2. 53に示す顕微鏡画像からディンプルのピッチが $200\mu\text{m}$ で形成されていることを確認した。

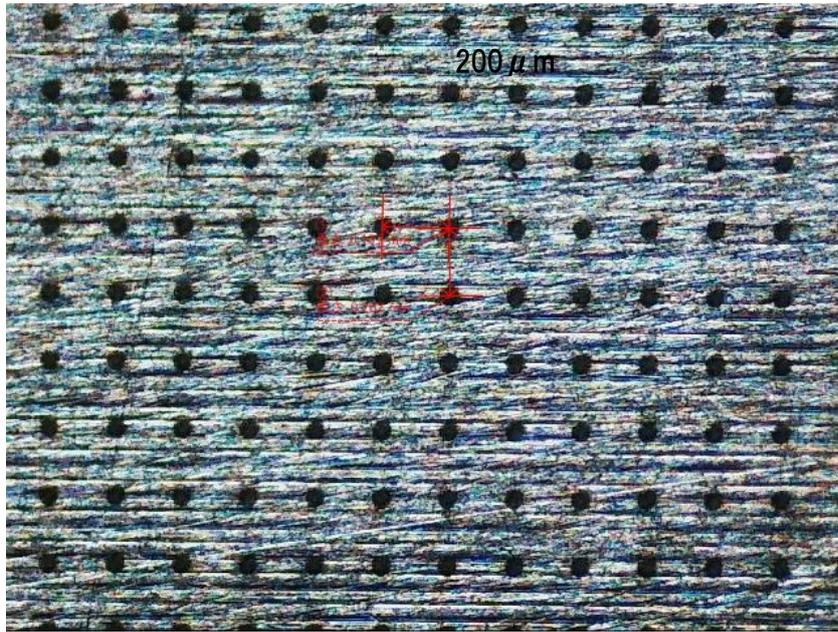
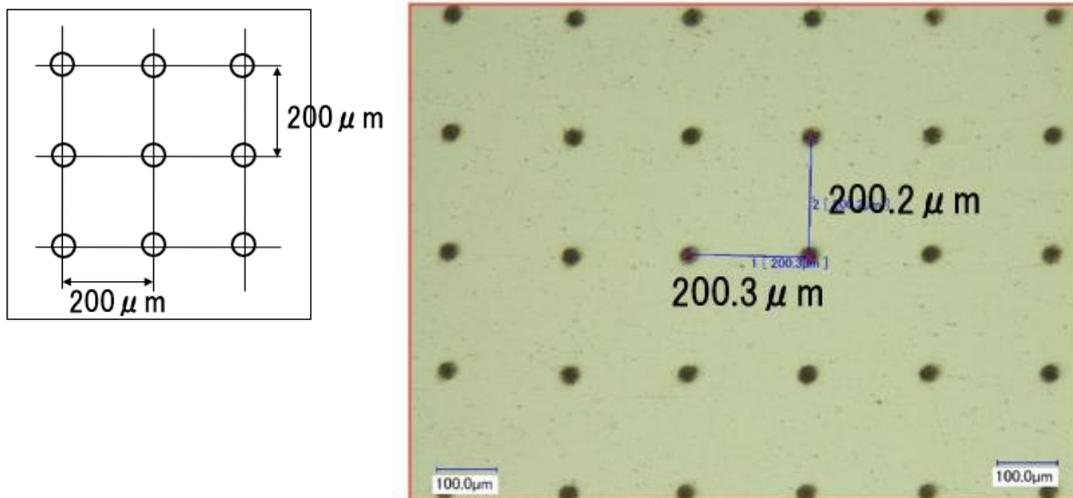


図2. 52 ディンプルの顕微鏡画像



a. ディンプルパターン

b. 顕微鏡画像

図2. 53 ディンプルピッチ

レーザー顕微鏡を使用して、形成されたディンプルの形状を計測した。図2. 54に計測データを示す。ディンプルの形状はレーザー光のプロファイル（出力分布）であるガウシアン分布と相似形となる。そのため、ディンプル径の正確な測定が不可能であるが、計測値は $\phi 45.0 \mu\text{m}$ であり、ほぼ $\phi 50 \mu\text{m}$ となっている。ディンプルの直径はコリメータを使用して集光レンズ入射するレーザー光の直径を変化させることで調整することができる。ディンプルの深さの計測値は $5.5 \mu\text{m}$ であり、目標としている $5 \mu\text{m}$ を超える深さが得られている。ディンプルの深さはレーザー光の照射回数を設定することで調整することができる。

多点照射による円筒内面のディンプル加工においても、目標とするディンプル形状、直径： $\phi 50 \mu\text{m}$ 、深さ： $5 \mu\text{m}$ 、ピッチ： $200 \mu\text{m}$ を得ることが可能であることを検証することができた。

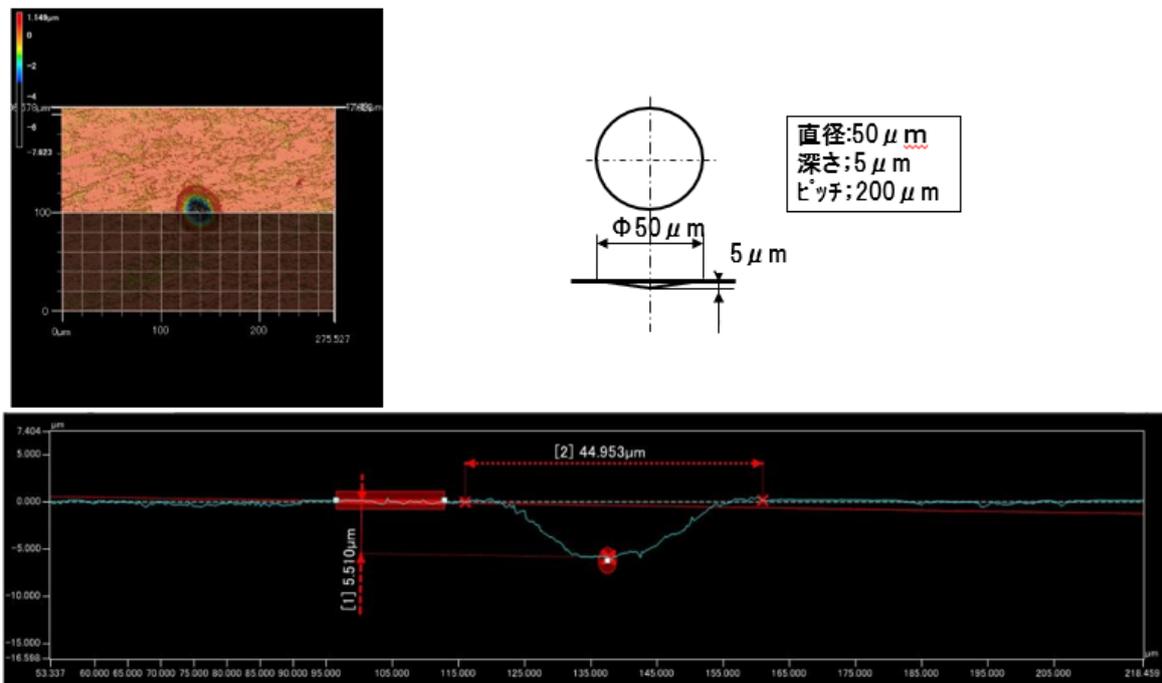


図2. 54 ディンプル形状計測結果

円筒加工システムを使用して、図2. 55に示すように、内径 $\Phi 86\text{mm}$ の円筒試験片の内面にレーザテクスチャリング加工し、加工時間を計測した。

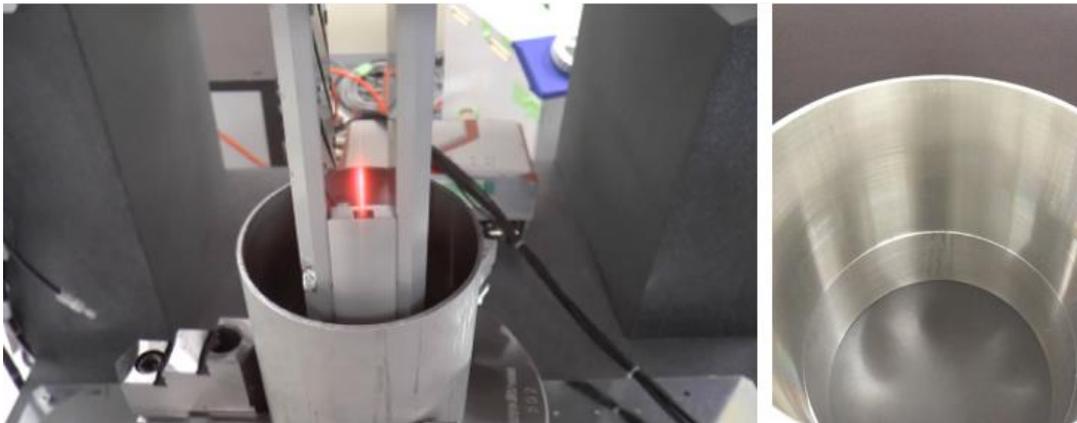


図2. 55 円筒内面のレーザテクスチャリング加工状況

スキャナー走査速度 $100\text{m}/\text{sec}$ 、周波数 500kHz 、照射回数はディンプルの深さ $5\mu\text{m}$ を確実に確保するため 60Shot として、加工を行なった。加工形状については同期調整により、直径 $50\mu\text{m}$ 、深さ $5\mu\text{m}$ 以上、ピッチ $200\mu\text{m}$ にて加工されていることが確認された。しかし、加工時間を計測した結果、円筒1周の加工に5.7分を必要とすることが判明した。

回転ステージの動作時間を短縮するため、これまでの、1ラインを60回繰り返して $5\mu\text{m}$ の深さを加工した後に、 0.2mm ピッチ移動し、これを1350回繰り返す方法から、50ライン（ 10mm 分）を、ガルバノスキャナーの 0.2mm ピッチ送り一括加工して、回転ステージを動作して、これを60回繰り返して加工し、回転ステージを27回移動させる方法に変更した。これにより2.7分まで加工時間が短縮されることが確認できた。

10mm 幅を加工する際、この 10mm の範囲はR形状の円筒内面にレーザが垂直照射されることになり、 10mm の外側部分では、ディンプルの形状が楕円になる。CADで、楕円量を計測した結果を図2. 56に示す。ディンプルの形状は短径が $50\mu\text{m}$ で長径が $\phi 50.3\mu\text{m}$ の楕円となるが、その差は $1\mu\text{m}$ 以下の微小量であるため、摩擦係数への影響はほぼ無視できるものとした。

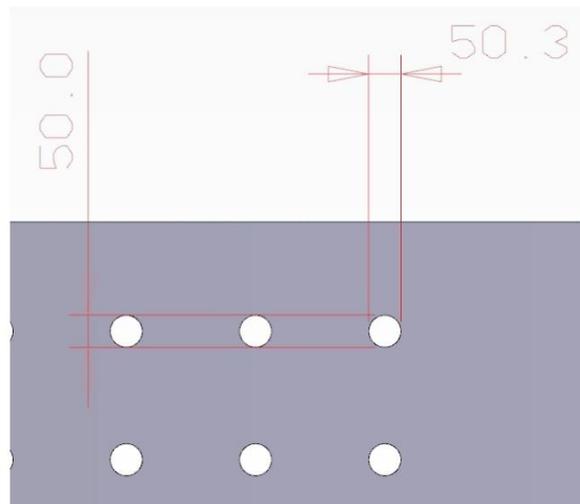


図2. 56 一括照射による楕円量の CAD データ検証

10mm一括照射により、回転ステージの移動回数を低減しても、加工時間短縮の効果が予想より小さかったため、レーザ照射のタイミングをオシロスコープで計測し原因を調査した(図2. 57)。

調査の結果、1ラインを60回同じ場所に繰り返してレーザを照射して加工する場合、1回辺り4msecを要しており、ポリゴンスキャナーからのレーザ照射開始信号に3msecのタイミングの遅れが発生していることが判明した。この検証から1ラインは100m/secで加工ができていることが確認されたが、次のラインを加工するのに待ち時間が3.5msec生じていることが原因であることが明らかになった。



図2. 57 オシロスコープによるレーザ照射タイミングの計測

従来の単点加工による方式が数時間を必要とすることと比較すると、多点加工により加工時間は2.7分と1/10以下に短縮され、高速加工の成果はえられたが、エンジンのシリンダボアを対象とした1ボア/1分以下の目標は未達となった。

さらなる高速化の探索を進めることと併行して、これまで、調査検討を進めてきたエンジンのシリンダボアに変わる適用対象に対して、先行してサンプル加工に対応していくことで、事業化の検討を進めていく。

第3章 全体総括

本研究開発ではポリゴンスキャナーによる超短パルスレーザの高速走査により、自動車の摺動面低摩擦化の機能と、量産に適用可能な生産性を有する高速レーザテクスチャリング加工装置、加工技術の開発を進めてきた。

高速レーザテクスチャリング精密加工装置の開発では、100m/秒の超高速走査が可能なポリゴンスキャナーと高繰り返し2MHzの超短パルスレーザ(500fs)を搭載した高速レーザテクスチャリング加工システムの製作を完了した。ポリゴンミラーの超高速回転とレーザパルス照射タイミングを同期させることで平面、および円筒内面へのディンプルパターンの形成、ナノピッチの周期的な溝構造の形成を可能とした。

高速レーザテクスチャリング加工技術の開発では、100m/秒の超高速でのディンプルパターンの形成、100m/秒の超高速でナノ周期構造の形成技術を確立し、ポリゴンスキャーによる超高速テクスチャリング加工を実証した。

また、Φ86mm円筒内面に2.7分/周でディンプルパターンを加工し、従来の10倍以上の高速加工が可能であることを実証した。形成したディンプルパターンの機能として、摩擦係数を50%低減することを確認し、摩擦係数の低減効果を実証した。:

当初、目標としたΦ86mm円筒内面に1分/周でのディンプルパターンについては未達であり、今後も高速化の検討を進めていく。

超短パルスレーザによるテクスチャリング加工は時間がかかり、量産には適さないというのが、まだまだ、世の中の一般常識であったが、業界紙への投稿、セミナー、講演会での技術プレゼン、展示会への出展等で本技術の紹介に努めてきた。特に展示会の出展の効果として、複数の川下企業様から新しいニーズをいただきサンプル加工検討の話が進みつつある。

レーザテクスチャリング面は低摩擦化の他に、撥水性、放熱性、光反射制御の機能を有している。放熱性向上、光透過精向上のニーズ等の新しいニーズも展示会等での新しい顧客から頂いている。

本開発の高速レーザテクスチャリング加工システムにより、これまで困難とされてきた生産性、コスト、加工範囲の課題が解決され、レーザによる新しいテクスチャリング技術の自動車への適用が可能となった。名古屋工業大学と産業技術センターの指導を受けながら開発を継続し、併行して川下企業のニーズに対応してサンプル出荷、評価を進めて具体化し、事業化につなげていく。