

< 2 > 新規産業開発研究

< 2 - a > 先導的探索 / 実証研究

サブテーマリーダー：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 土屋裕
(代理：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究リーダー 青島紳一郎)

小テーマ： レーザーによる高機能加工～高機能レーザー加工

研究従事者：光科学技術研究振興財団 コア研究室 研究員 松田稔、神田日佐幸

(1) 研究の概要、新規性及び目標

研究の概要

本事業で開発する「実証レーザーシステム」の「超高密度フォトン」による「非熱加工」は、新規産業展開の一分野として期待できる。フェムト秒レーザーは超高密度フォトンを利用できる手段の一つである。新規産業創出のための基盤技術を開発・蓄積し新規産業創出の可能性を実証した。

一般に、材料を任意に加工するにあたっては、各々の材料に適した加工条件と結果に関する基本的な情報が必要である。フェムト秒レーザーを用いて「非熱加工」についての加工情報データベースを構築し、当地域特有の新規産業創出に有用な基盤技術としてまとめた。

研究の独自性・新規性

本事業で開発する「実証レーザーシステム」の「超高密度フォトン」による「非熱加工」は、新規産業展開の一分野として期待できる。しかし、先端技術であるために地域企業にとっては取り組みが困難で馴染みが薄い。そこで、地域産業界に密着したニーズ調査を行い、その結果に基づいた多数のフェムト秒レーザー加工事例を提供し、データベースとしてまとめた。ニーズに基づいた検討は独自であり、また、加工事例の幅広さは他に類を見ない。プレス記事として取り上げられた例として、地域産業の一つである繊維に適用した場合に、焦げ目のない加工や脱色を初めて実現し、繊維加工の有効性を新たに確認できた。

研究の目標（フェーズ毎に数値目標等をあげ、具体的に）

フェーズ

ネットワーク型地域COEでの連携を図りながら、新規産業の可能性のある研究項目をより具体的に探索研究する。各大学との意見交換を行って、新医療分野で有望な新規産業の検討を行う。非熱加工については、検討・調査を行い、基礎実験に着手すべき課題を策定する。

ニーズ調査・探索

「レーザー光の産業応用に関するアンケート調査」を行って、地域のニーズを調査する。さらに、「レーザー光の産業応用に関するアンケート調査」の結果に基づいて新技術エージェントが行う聞き取り調査と連携し、その結果を詳細に検討して、地域の新規産業創出のための基盤技術を探索するとともに、その結果を非熱加工やレーザー加工の研究等にフィードバックする。また、新規産業の探索、および本事業の成果の展開を推進するため、レーザー加工実験が簡単にできる環境の整備を検討する。浜松医科大学との交流会を開催して、医療分野におけるレーザー加工の可能性を調査・検討し、新規産業創出に有用となる基盤技術の探索を実施する。

新規産業創出の基盤技術である材料の加工技術に的を絞り、多くの試料を加工することにより、高

密度超短パルスレーザーを用いた材料加工(非熱加工)の特性や可能性を探ることを目的とした。この際、テラワットのピーク出力をもつ高強度レーザーパルスによる非熱加工も試みることにした。

フェーズ

レーザー加工実験から得られる様々な情報を実証レーザーシステムの研究にフィードバックするとともに、実験過程で得られる加工情報を、今後データベース化し新産業創出のための基盤技術として蓄積する。地域の特異性を考慮しながら新規産業創出の可能性の実証を目指して、材料加工技術に的を絞り、レーザーによる高機能加工の研究を行う。地域企業から具体的・実用的な加工要求が出始めた金属材料と透明材料の加工実験を重点的に行う。金属材料の加工については、薄板への微細穴あけ加工や微小部の切断、表面形状変化による機能付加を中心に展開する。透明材料の加工については、穴あけ、切断、溝切りを中心に展開する。また、地域企業からの加工要望には可能な限り対応し、様々な材料を加工することによって、新規産業創出のための基板技術の蓄積を継続する。

並行して、生体試料の加工も試みる。また、本事業の成果の一部として整備してきたレーザー装置群(高強度超短パルスレーザー、YAG-SHGレーザー)も活用して、新規産業創出を目指したレーザーによる高機能加工および生体応用の研究を行なう。

(2) 研究の進め方及び進捗状況(目標と対比して)

ニーズ調査・探索

本事業と静岡県浜松工業技術センターが連携して実施した「レーザー光の産業応用に関するアンケート調査」およびその後の聞き取り調査から地域のニーズを調査した。さらに、浜松医科大学などの協力を得て、医療分野の非熱加工応用を調査検討した。これらの結果、当静岡県西部地域では医療以外の分野を含む広い分野にニーズがあることが明らかになった。

(ア) 地域のニーズ調査

「レーザー光の産業応用に関するアンケート調査」およびその後の聞き取り調査から、地域の産業におけるニーズを探索した。

地域の関連業界 646 事業所を対象として実施した「レーザー光の産業応用に関するアンケート調査」に基づき、レーザー加工に関するニーズを調査した。

回答集計結果の一部を図1、図2に示す。図1はレーザー光の適用分野の分布を示す。機械・金属分野への適用を考えている企業が極めて多い。また機械・金属分野における適用希望の内訳は、切断、溶接、接合、マーキング、彫刻、表面処理、表面改質等、各種材料の加工に関する内容が挙げられていた。図2は企業が新製品や新技術開発を行う際の保有技術の扱い方を示す。大多数の企業が、保有する技術をベースに新技術や異種技術を取り入れることを考えている。これらの結果から地域の関連業界ではレーザーを、機械金属の加工分野及び既存産業の高度化に適用することを望んでいることが推測できる。

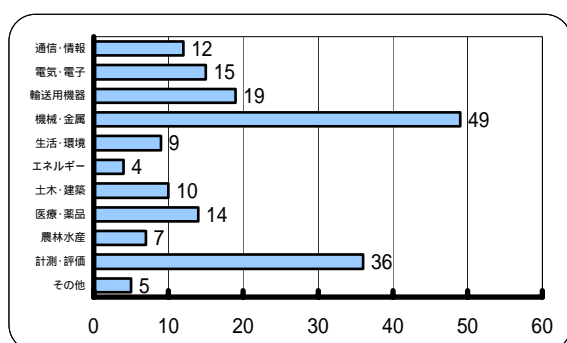


図1 レーザー光の適用を考える分野

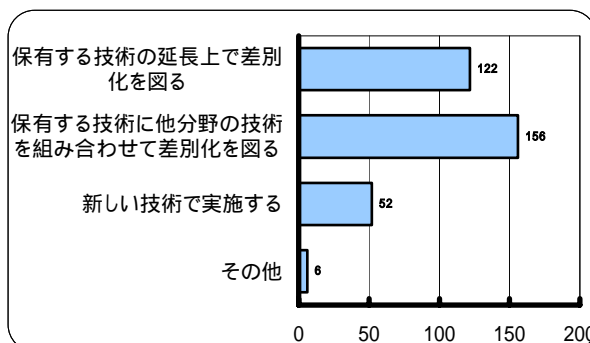


図2 新製品・新技術の開発に対する対処方法

(イ) 医療分野のニーズ調査

医療分野のニーズを探るため、前年度に引き続き、浜松医科大学との交流会を開催した。ここでは、最新の医療現場におけるレーザー応用機器の使用状況や改良点等が議論された。今後も、調査・検討を継続して、有望な応用分野を探索する。

超短パルスレーザーによる材料加工実験

本事業で開発する「実証レーザーシステム」の「超高密度フォトン」による「非熱加工」は、新規産業展開の一分野として期待できる。フェムト秒レーザーは超高密度フォトンを利用できる手段の一つである。

一般に材料を任意に加工するにあたっては、各々の材料に適した加工条件と結果に関する基本的な情報が必要である。本分担課題ではフェムト秒レーザーを用いて「非熱加工」についての加工情報データベースを構築し、当地域特有の新規産業創出に有用な基盤技術とすることを目的とす

る。また、「レーザー光の産業応用に関するアンケート調査」の結果に基づいて、新技術エージェントが行った聞き取り調査等と連携して調査した結果、地域の新規産業としてフェムト秒パルスによる超硬材料の非熱加工処理等があることが明らかになり、応用実験を開始した。

(ア) 機器の整備

加工実験を行うために整備した実験環境を図3に示す。加工対象の設置方法によって、レーザーの光路を2種類用意した。加工対象を、図3の黄色の光路では垂直に、ピンク色の光路では水平に設置する。加工の性質に合わせて設置方法を選択する。産業の現場に導入することを前提として、大気中で実験することとした。

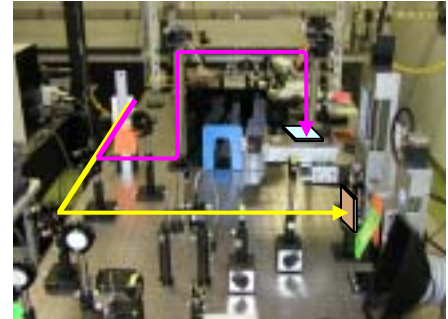


図3 加工実験環境

(イ) 加工対象の選定

ニーズ調査の結果を踏まえて、A.一般的な工業材料、B.地域特有材料、C.生体材料、D.企業から寄せられた要望材料等の観点から加工材料を選定した。

(ウ) 加工実験結果

非熱加工情報を収集するために、様々な材料に対して加工実験を行った。

加工実験は、レーザー光(波長 800nm、パルス幅 < 50fs、出力 0.60W、繰返周波数 1kHz)を焦点距離 200mm のレンズで加工対象に集光し 1次元に走査した。

A. 一般的な工業材料

ステンレス



図4.a ステンレスの切断

図4.b 切断面

図4.c 穴あけ

厚さ 1 mm のステンレス板を、走査速度 4 mm/s で約 750 回走査して切断した。材料表面の加工跡の金属顕微鏡(50倍)の画像を図4.aに示す。切断面の画像を図4.bに示す。走査せずに穴あけをした結果を図4.cに示す。加工部周辺に顕著な熱的な影響は認められない。

アルミニウム

厚さ 2 mm のアルミニウム板を、走査速度 0.2mm/s で1回走査して溝切りした。材料表面の加工跡の金属顕微鏡(50倍)の画像を図5.aに示す。走査せずに穴あけをした結果を図5.bに示す。加工部周辺に顕著な熱的な影響は認められない。



図 5.a アルミニウムの溝切



図 5.b 穴あけ

テフロン

厚さ 2 mm のテフロン板を、走査速度 0.2mm/s で 1 回走査して溝切りした。材料表面の加工跡の金属顕微鏡(50 倍)の画像を図 6 に示す。加工部周辺に顕著な熱的な影響は認められない。



図 6 テフロンの溝切

アクリル

厚さ 1 mm のアクリル板を、走査速度 4 mm/s で約 100 回走査して切断した。材料表面の加工エッジの金属顕微鏡(50 倍)の画像を図 7.a に示す。切断面の画像を図 7.b に示す。加工部周辺に顕著な熱的な影響は認められない。



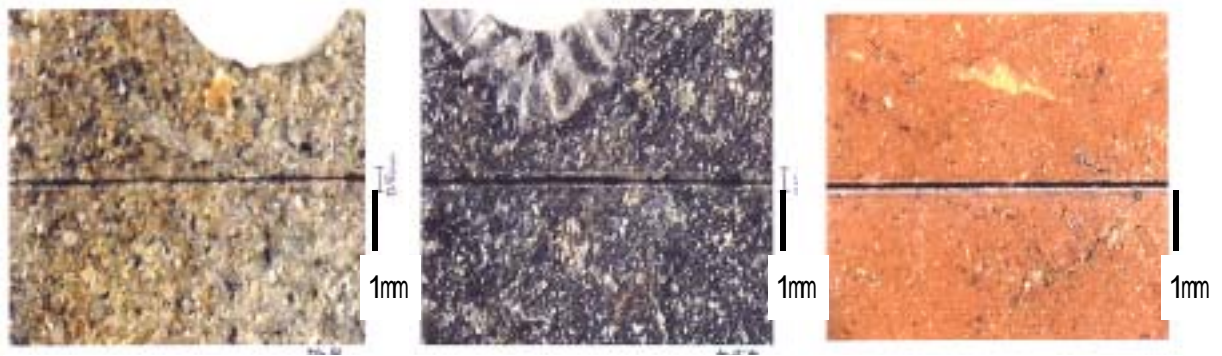
図 7.a アクリルの切断



図 7.b 切断面

岩石材料

加工対象範囲の拡大の一環として、岩石に着目し予備的な加工実験(溝切り)を行った。加工対象は堆積岩の代表として砂岩、火山岩の代表として玄武岩、身近な材料として素焼きの植木鉢、コンクリートを選んだ。中心波長 800nm、パルス幅 50fs、出力 700mW、繰り返し周波数 1kHz のレーザーを、焦点距離 200mm の単レンズで加工対象材料表面に集光した。材料は 1 次元移動ステージで移動させた。加工結果を図 8、図 9 に示す。目視及び実体顕微鏡による観察の結果、いずれの材料においても、適当な条件の下では、熱的な影響が極力抑制された加工結果を得ることができた。



砂岩

玄武岩

素焼き植木鉢

図8 岩石の加工例

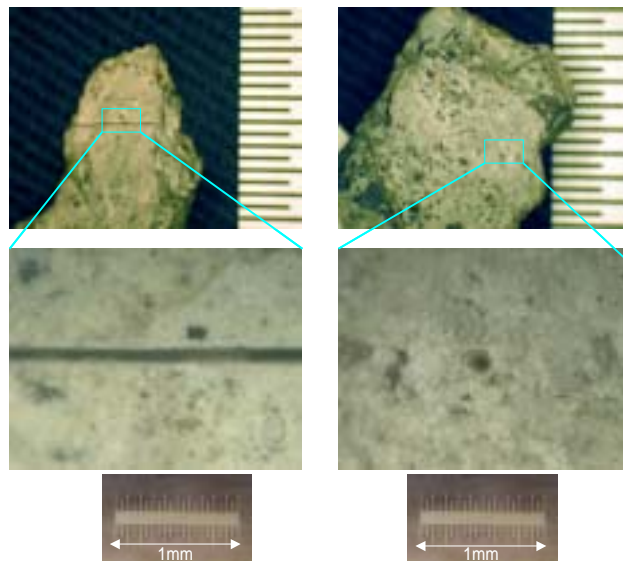


図9 コンクリートの溝切、穴あけ

透明材料

加工対象範囲の拡大の一環として、透明材料に着目し予備的な加工実験を行った。加工対象として顕微鏡観察用スライドガラスと一般工作用透明アクリルを選択した。中心波長 800nm、パルス幅 50fs、出力 650mW、繰り返し周波数 1kHz のレーザーを、焦点距離 200mm の単レンズで加工対象材料表面に集光した。

(ア)スライドガラスの加工

フェムト秒レーザーで誘起する多光子吸収作用によってガラス内部を加工した例が報告されている。我々も加工技術の一つとして加工ノウハウを蓄積するために、厚さ 1.5mm のスライドガラスを用いて加工予備実験を行った。焦点の位置を試料表面を基準として光源側(プラス方向)に 5mm、光源から遠ざかる方向(プラス方向)に 4mm、1mm 間隔で移動させ、レーザービームを 1 秒間照射して加工した。

加工結果を図 10 に示す。-4 ~ +3mm の位置で、試料表面に加工痕が残った。しかし、スライドガラスの内部のみに加工痕をつけることはできなかった。また、いずれの加工痕の周囲も茶色に変色した。これは、ガラス内の金属成分がレーザービームに何らかの反応を示したものと考えられる。ガラスの内部を加工するためには、ガラスの品質、NA の大きな対物レンズの使用、照射出力の制御について検討する必要がある。

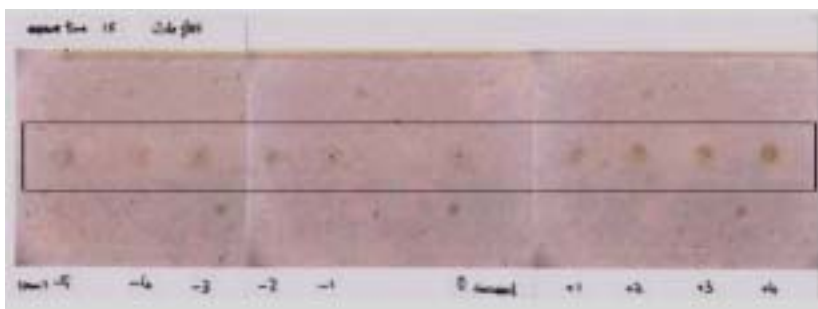


図 10 スライドガラスの加工における焦点位置の影響

透明材料(顕微鏡スライドガラス)内部の加工実験

超短パルスレーザーの特徴である「多光子吸収」による加工の応用の一つとして、透明材料(ガラス)の内部加工がある。

実験のセットアップおよび加工結果を図 11 に示す。中心波長 805nm、パルス幅 45fs、出力 600mW、繰返周波数 1kHz のレーザービームをアパーチャで制限し、50倍の対物レンズ(NA0.55、作動距離 8.1mm)を用いて試料(顕微鏡用スライドガラス)に集光した。焦点位置は試料(t=1mm)の表面から裏面まで段階的に変化させた。各々の焦点位置で、試料を 20mm/秒の速さでレーザービームに対して垂直方向に走査し加工した。

加工したスライドガラスをレーザー照射方向から、顕微鏡で観察した。加工焦点位置の変化に伴って顕微鏡画像の合焦位置も変化し、試料内部の任意の位置が加工されていることを確認した。加工の幅は 30 ~ 40 μm 程度である。スライドガラスを対象として透明材料の内部を加工できることを確認した。

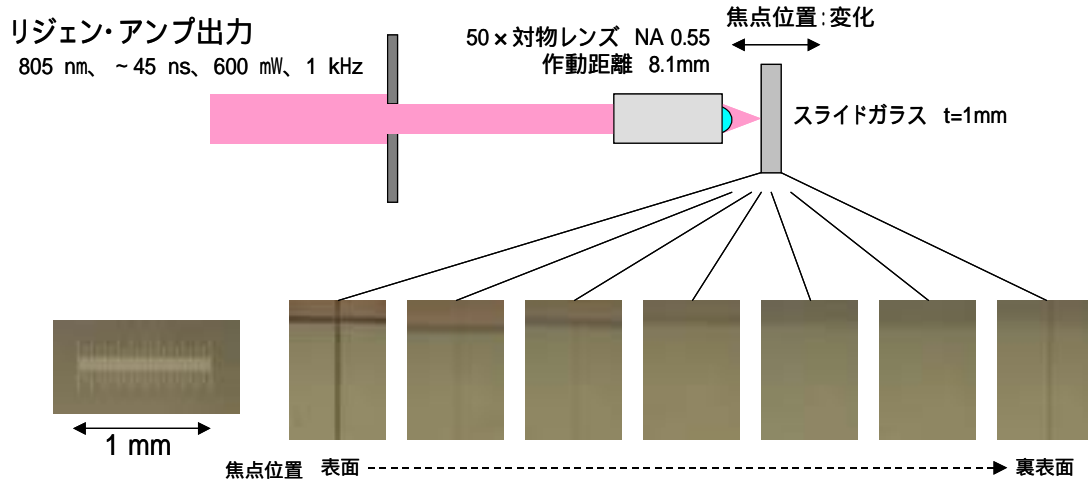


図 11 透明材料内部加工実験

透明材料(顕微鏡用スライドガラス)への溝切加工

フェムト秒レーザーを用いて、 μ -TASの一部として考えられるマイクロ流路の作製を、顕微鏡用スライドガラスに溝切加工として試みた。顕微鏡用スライドガラスは一般に白板ガラスと呼ばれ、無水ケイ酸 72%、炭酸カリウム 18%、炭酸カルシウム 10%を混ぜ合わせ溶かして作られており、屈折率は 1.52 程度のガラスである。再生増幅器出力のフェムト秒レーザーパルス光(中心波長 800nm、パルス幅 60fs、繰返周波数 1kHz、出力 620mW)を、偏光板の組み合わせで 10mW(10 μ J/pulse)まで減光し、50 倍の顕微鏡対物レンズ(NA=0.55)で材料表面に集光した。試料は、電動ステージで一次元に移動した。移動速度を 0.1mm/s から 10mm/s まで変化させ、加工結果の移動速度依存性を把握した。加工結果の例(電子顕微鏡観察像)を図 12~14 に示す。移動速度 10mm/s の時の結果(図 12)では、レーザーの繰返周波数 1kHz に対応した加工痕が確認できる。1つの加工痕は1パルスで加工されている。移動速度が遅くなるに従い、孔形状から溝形状へ変化する。電子顕微鏡での観察像からは溝内面の平滑性が不足しているように判断できる

透明材料(合成石英)内部の加工実験

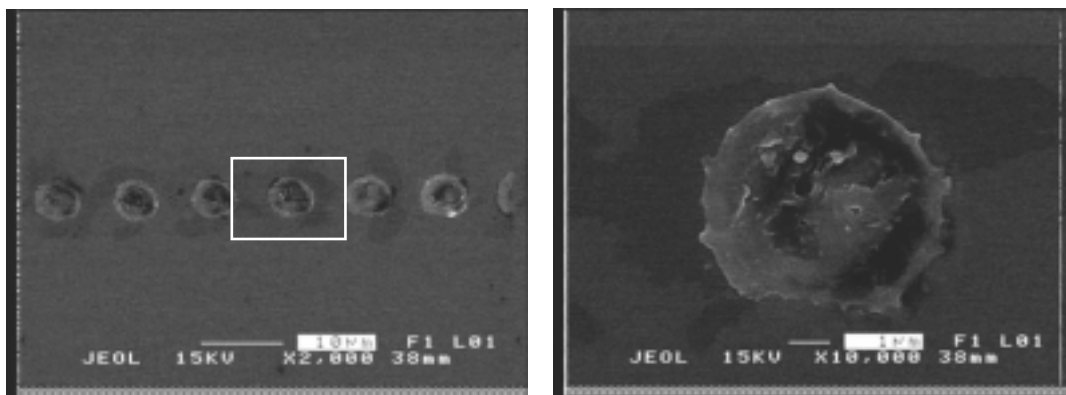


図 12 移動速度 10mm/s の時の加工結果(電子顕微鏡写真)

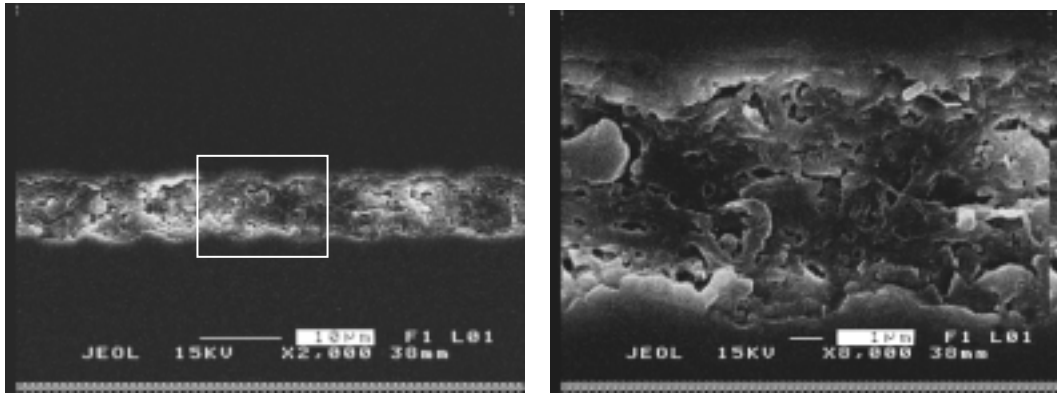


図 13 移動速度 1.0mm/s の時の加工結果(電子顕微鏡写真)

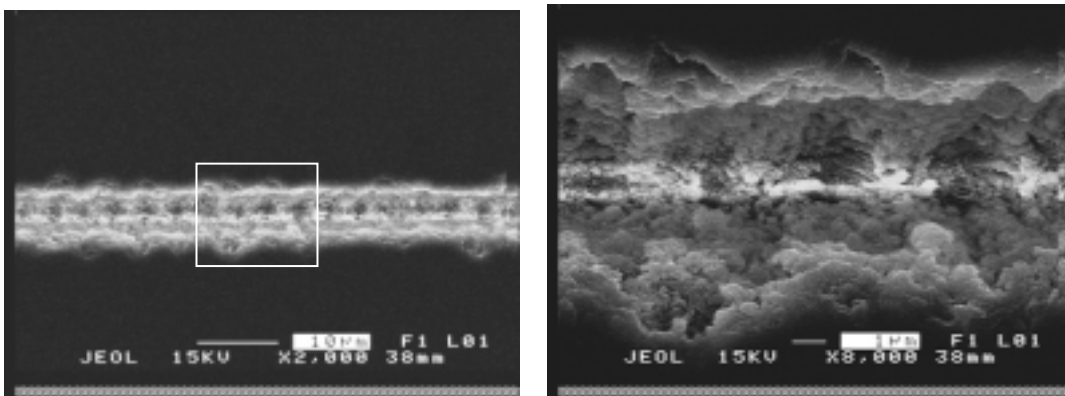


図 14 移動速度 0.1mm/s の時の加工結果(電子顕微鏡写真)

超短パルスレーザーの特徴である「多光子吸収」による加工の応用の一つとして、透明材料(ガラス)の内部加工が存在する。透明材料内部の任意の場所のみを微細加工することは、従来の方法では非常に困難であった。実験のセットアップを図 15 に示す。中心波長 805nm、パルス幅 45fs、出力 600mW、繰返周波数 1kHz のレーザ - ビームをアパーチャで制限し、50 倍の対物レンズ(NA0.55、作動距離 8.1mm)を用いて試料に集光した。焦点位置は試料の表面から裏面方向にまで段階的に変化させた。各々の焦点位置で、試料を 4mm/秒の速さでレーザービームに対して垂直方向に走査し加工した。

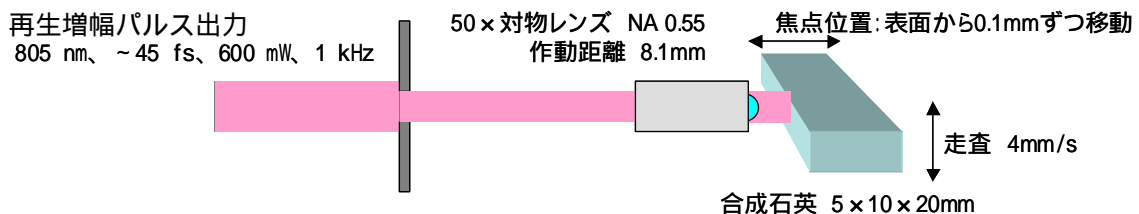


図 15 透明材料の内部加工実験のセットアップ

加工結果を図 16 に示す。加工した合成石英を顕微鏡で観察した。加工焦点位置の変化に伴って、試料内部の任意の位置が加工されていることを確認した。加工の幅は 30 ~ 40 μm 程度である。

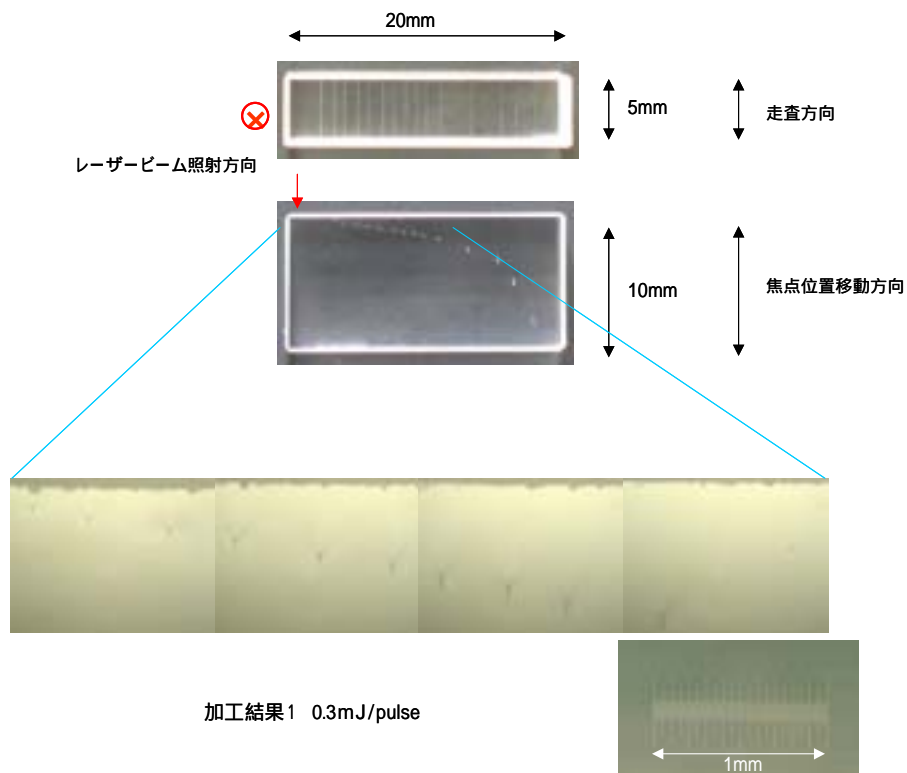


図 16 透明材料の加工結果

透明アクリルの加工

加工ノウハウを蓄積するために、厚さ 2mm のアクリルに対して加工予備実験を行った。焦点の位置は試料表面に固定した。レーザービームを照射する時間(=レーザーパルス数)を変化させ加工の変化を観察した。

加工結果を図 17 に示す。照射時間は、図中左から 1/500、1/250、1/125、1/60、1/30、1/15、1/8、1/4、1/2、1、3、10、30、60、180、300、600 秒である。レーザーを照射した面の穴径は照射時間を変化させても変わらない。表面においては、非熱加工が行われている。穴の深さは照射時間と比例はしていないが増加する。また、3 秒以上の照射においては加工の直線性が失われ、熱的な影響とも考えられる様子が観察される。パルスの繰り返し周波数が高いために、穴が深くなるにつれて試料内部に熱がこもってしまうためだと考えられる。

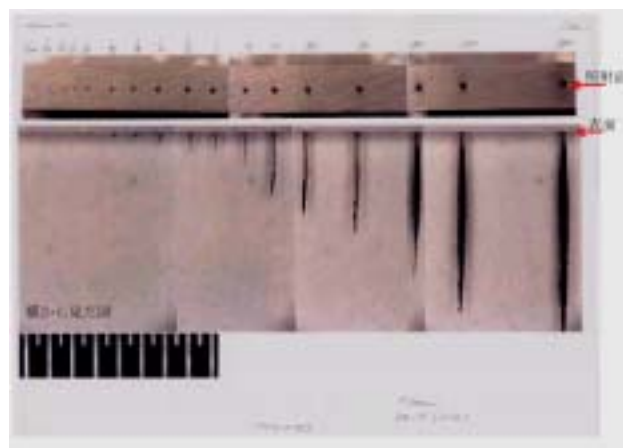


図 17 透明アクリル加工におけるレーザー照射時間の影響

金属表面への微細周期構造の作成

直線偏光しているフェムト秒レーザーを、加工閾値近傍のフルエンスで材料表面に照射すると、波長オーダーの微細周期構造が形成されることが良く知られている。本事業においても、この加工現象に着目し、地域企業がその応用範囲を模索できるように、加工サンプルを作成した。加工対象としては、一般的な工業材料であるステンレスを選定した。

フェムト秒パルス再生増幅器の出力光(中心波長 805 nm、パルス幅 50 fs、繰返周波数 1 kHz、平均出力 620 mW)を、ND フィルタで 0.8 mW 程度までに減光後、焦点距離 100 mm の平凸レンズで試料表面に集光し、試料を 1 mm / 秒の速度で一次的に移動した。加工結果を図 18 に示す。偏光方向は図中の水平方向である。偏光方向に垂直な方向に微細な周期構造が形成されることが確認できた。今後、地域企業へ本加工情報を提供するとともに、実際に必要とされる材料を見つけ出し、加工することを行いたい。

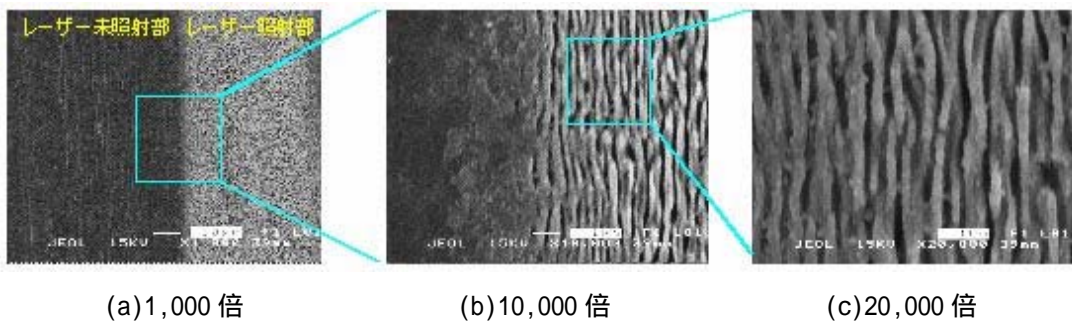


図 18 ステンレス表面の形状変化(1 μm 間隔以下の周期構造)電子顕微鏡写真

B. 地域特有材料

コールテン(木綿)

出力は ND フィルタを使い 0.22W とし、走査速度は 1 mm/s で 1 回走査とした。コールテンの表面部のみを選択的に切断した。加工跡の画像を図 19 に示す。加工跡には顕著な熱的影響は認められない。

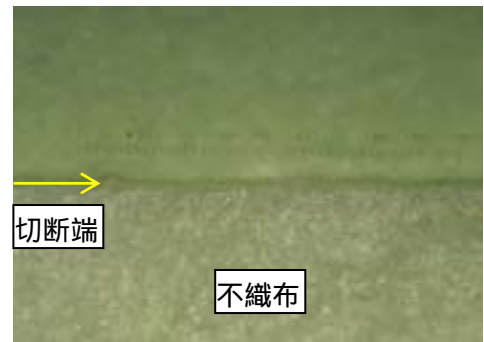
図 19 コールテンの切断



不織布(ポリプロピレン)

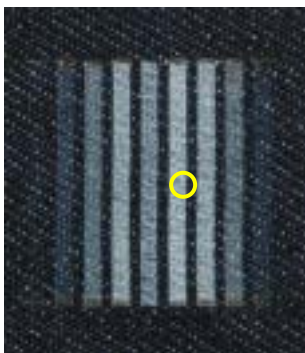
出力は ND フィルタを使い 0.30W とし、走査速度は 20mm/s で 2 回走査とした。加工跡の画像を図 20 に示す。加工跡には極僅かに溶融している部分が認められるが、顕著な熱的影響は認められない。

図 20 不織布の切断



デニム(インディゴ染)

走査速度は 20mm/s で、2 次元的に 1 回走査した。加工後の画像を図 21.a に、黄色の丸内の拡大画像を図 21.b に示す。図 20.a では焦点の位置による加工の違いを確認した。顕著な熱的影響が現れずに、インディゴ染めデニムの表面が脱色された。



(左)図 21.a デニム表面の脱色

(右)図 21.b 左図 内拡大図

ヒノキ

厚さ 5 mm のヒノキを切断した。走査速度 20mm/s で 400 回走査した。表面からの加工跡の画像を図 22.a に、その切断面を図 22.b に示す。熱的な影響がほとんど認められない加工であることが確認できる。



図 22.a ヒノキの切断



図 22.b 切断面

C. 生体材料

生体材料(豚肉)の加工実験

超短パルスレーザーの特徴である「非熱加工」を応用する分野の一つとして、医用分野が存在する。生体材料に対する加工データを取得する準備として、豚肉の加工を行った。実験のセットアップを図 23 に示す。中心波長 805nm、パルス幅 45fs、出力 600mW、繰返周波数 1kHz のレーザー - ビームを、焦点距離 200mm の平凸レンズで試料(豚肉)表面に集光した。この時のレーザーフルエンスは約 $12\text{J}/\text{cm}^2$ である。

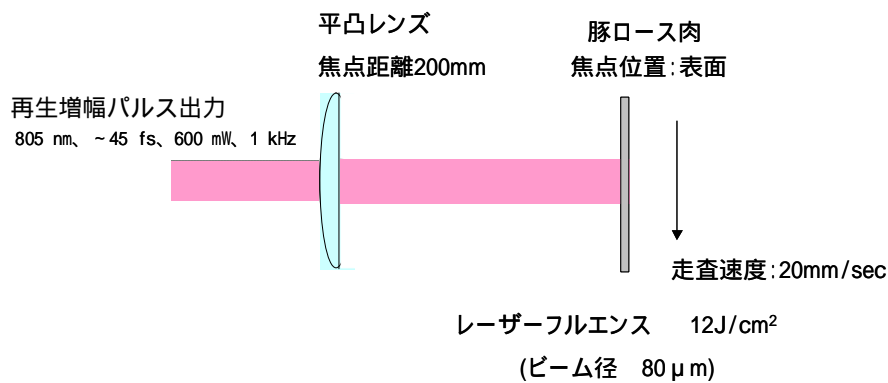


図 23 生体加工実験のセットアップ

豚肉表面近傍にスジを入れた加工結果を図 24 に示す。試料は 20mm/秒の速さで走査した。熱的な変色を伴わずに、スジ(傷)が刻まれている。

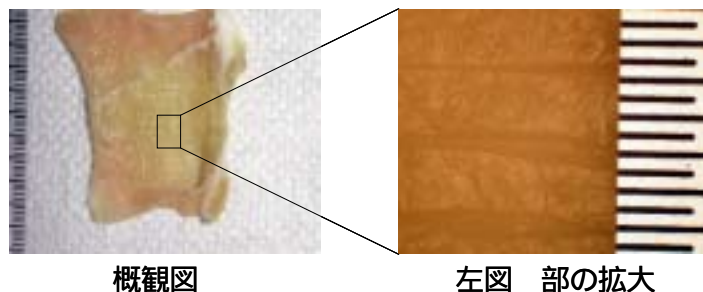


図 24 豚肉表面のスジ入れ加工例

厚さ 4~5mm 程度の豚肉を切断した結果を図 25 に示す。試料は 20mm/秒の速さで走査した。切断面を観察しても熱的な変色は認められない。

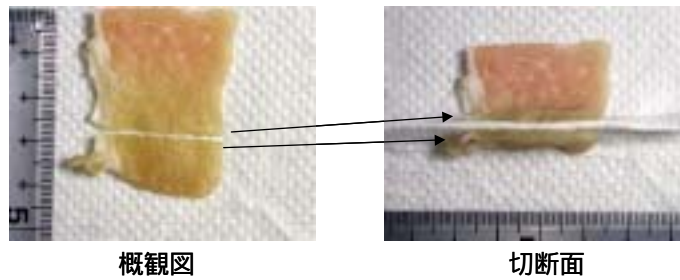


図 25 豚肉の切断加工例

厚さ 4~5mm 程度の豚肉に穴あけ加工を行った結果を図 26 に示す。左図は顕微鏡観察における反射光による観察図、右図は穴の輪郭を明確にするために透過光により観察した図である。加工穴の周囲には熱的な変化は認められない。穴の直径は 100 μm 程度である。

生体材料(豚肉)を対象とした非熱的な加工を、実験により確認した。熱的損傷具合の確認は実体顕微鏡による目視で行ったが、今後は細胞レベルにおける確認が必要である。さらに、生体に対する非熱加工の需要や医用への適用方法について検討が必要である。

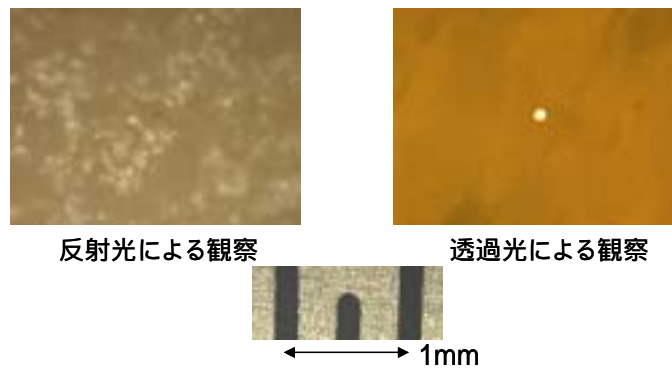


図 26 豚肉の穴あけ加工例

D. 企業から寄せられた要望材料等

フェムト秒レーザーの産業応用を見据えて、前年度に行なった「レーザー光の産業応用に関するアンケート調査」回答企業の中から、フェムト秒レーザー加工に特に興味を示した企業を選定し、訪問・聞き取り調査を行なった。

超硬材料

調査の結果、「超硬材料」の加工に対する要望を把握した。静岡県浜松地域は国内シェア 70%を占める機械刃物類の特産地であり、製品のひとつであるチップソー(刃先に超硬チップを使用した丸のこ)の高品質超硬チップの加工に、フェムト秒レーザーを適用できる可能性が期待できる。

そこで、超硬材料の代表例として、実際にチップソーに撮りつけられる超硬チップ(主成分: WC、JISB4053: K20 相当)の加工を基礎実験として行った。

再生増幅パルス出力光(802 nm、 ~ 50 fs、560 mW、1 kHz)を焦点距離 200mm の平凸レンズで試料に集光し、速度 10mm/秒で走査した。また、走査を行わずに穴あけも行った。この時のレーザーフルエンスは約 $11\text{J}/\text{cm}^2$ (ビーム径 $80\ \mu\text{m}$)である。

結果を図 27～29 に示す。超硬材料は、難加工性材料として非常に加工し難いと言われてきたが、溝切り、穴あけとも、加工部周辺に熱的な影響をほとんど受けずに、 $80\sim 100\ \mu\text{m}$ 程度の加工幅で加工された。超硬チップの加工可能性が示されたことにより、今後はフェムト秒レーザーの産業応用分野の一つとして、チップソー関連材料の加工技術開発に取り組む予定である。

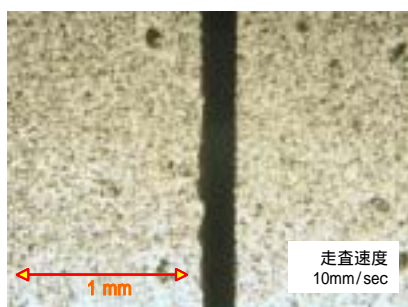


図27 超硬材料の溝切り

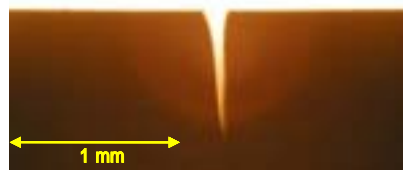


図28 断面(透過光による観察)

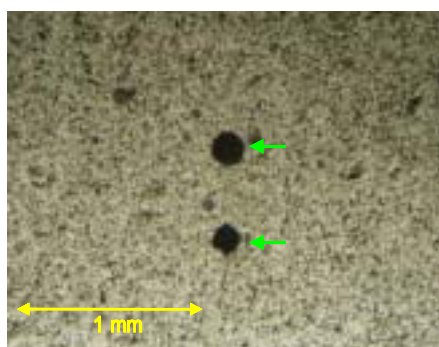
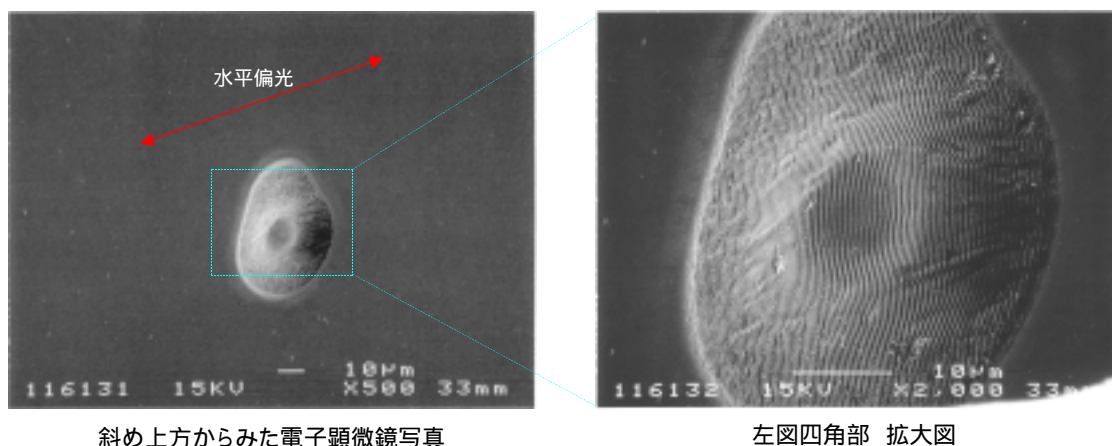


図29 超硬材料の穴あけ

炭素板の加工

前年度から地域企業に対して行っているレーザー加工に関するニーズ調査で、炭素板の加工ニーズを得た。そこで、GW 級高強度パルスレーザー(中心波長 800nm、パルス幅 50fs、繰返し周波数 1kHz)で炭素板を加工した。光学吸収フィルターでエネルギーを調節し、1 パルスあたりのエネルギーを $6\mu\text{J}$ とした。焦点距離 200mm の平凸レンズで試料表面に集光する。レーザーパルスを 16 発照射した時の加工痕の電子顕微鏡写真を、図 30 に示す。熱的な影響を受けずに加工されている様子がわかる。さらに、パルス光の偏光方向に垂直な縞模様が観察される。しかし、企業からの加工ニーズは、加工面の高い平坦度であったため、今回はニーズに応えることができなかった。



800nm, ~50fs, 1kHz, 16pulses, $6\mu\text{J}$ / pulse
平凸レンズ (f = 200mm)で集光

図 30 炭素板へのフェムト秒レーザーパルスの照射

アルミニウム(Al)5052 板への微細角穴加工

前年度から地域企業に対して行っているレーザー加工に関するニーズ調査で、図 31 に示すような Al5052 板への微細角穴加工(厚さ 0.3mm、100mm 角の板に、 $1\times 0.3\text{mm}$ の貫通各穴を $50\mu\text{m}$ 間隔で、全面に加工する)に関するニーズを得た。そこで、GW 級高強度パルスレーザー(中心波長 800nm、パルス幅 50fs、繰返し周波数 1kHz)で Al5052 板を加工した。光学吸収型 ND フィルターで光量を調節し、1 パルスあたりのエネルギーを 0.24mJ とした。焦点距離 200mm の平凸レンズで試料表面に集光し、穴が貫通したら $4\mu\text{m}$ ずつ移動させて加工した。

加工痕の実態顕微鏡写真を、図32に示す。(a)はレーザー照射側の加工部の様子、(b)は裏側の様子を示す。溶融によるダレ等の熱的な影響を受けずに加工されている様子がわかる。本加工では一つの穴加工に数分の時間を要した。したがって、1枚の板($100\times 100\text{mm}$)の全面に加工するためには莫大な時間を要する。他方、企業からの加工ニーズでは、加工の正確さと共に、コスト面、処理速度なども要求される。以上から、この種のフェムト秒加工では処理速度やコストの問題を解決する必要がある。また、フェムト秒レーザー以外のレーザーを使用することも検討する必要がある。

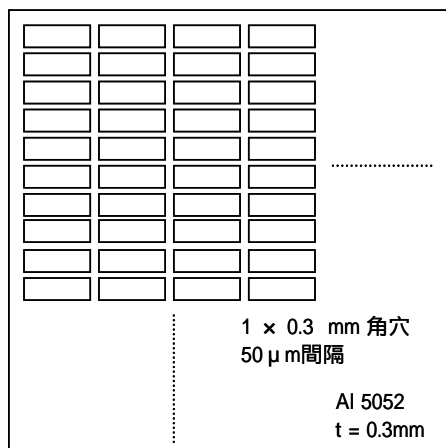


図 31 AI 5052 に対する加工要求

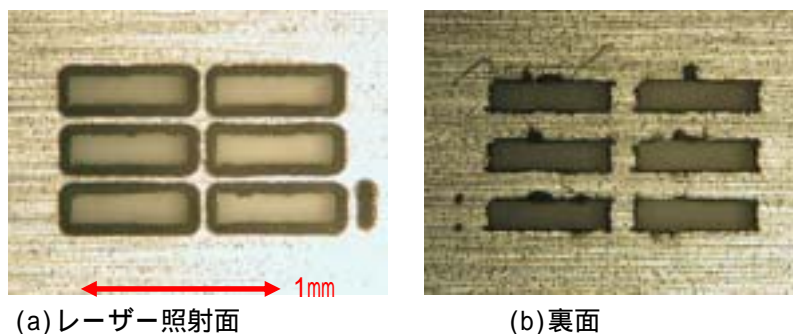


図 32 AI 5052(t=0.3mm)への微細角穴加工結果

PET 板への非貫通穴あけ加工

レーザー加工に関するニーズ調査で、図 33 に示すような PET(ポリエチレンテレフタレート)板への微細穴加工(厚さ 0.125mm、100×150mm 角の板に、直径 0.1mm の非貫通穴(深さ 0.1mm 程度)をできるだけ密に全面に加工する)に関するニーズを得た。そこで、GW 級高強度パルスレーザー(中心波長 800nm、パルス幅 50fs、繰返し周波数 1kHz)で PET 板を加工した。光学吸収型 ND フィルターで光量を調節し、1 パルスあたりのエネルギーを 0.08 mJ とした。焦点距離 200mm の平凸レンズで試料表面に集光し、加工深さを制御するためにシャッターで照射時間を制御し、一ヶ所につき 67 ショット照射して加工した。

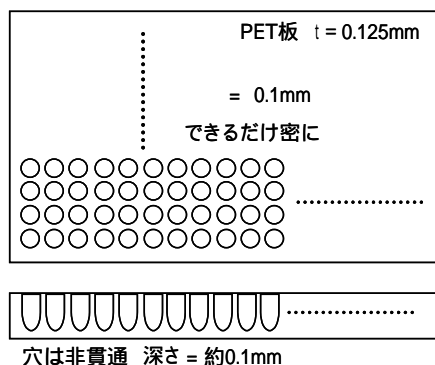


図 33 PET 板に対する加工要求

加工結果の電子顕微鏡写真を図 34 に示す。(a)は倍率 100 倍、(b)は倍率 1000 倍で斜め上方から観察した画像である。あらかじめ貫通しないショット数を選択してあるので、貫通はしていない(深さを計測する手段を持ち合わせていないので、正確な値は把握していない)。また、電子顕微鏡での観察では加工後の色の変化がわからないが、透明な PET 板は、やや茶褐色に変色していた。本加工では、 $1.5 \times 0.6\text{mm}$ 程度の領域の加工に 20 分程度の時間を要した。1 枚の板 ($150 \times 100\text{mm}$) の全面に加工するためには莫大な時間を要する。企業からの加工ニーズでは、加工の正確さ、透明度の維持と共にコスト面での要求が強い。以上から、この種のフェムト秒加工では処理速度やコストの問題を解決する必要がある。また、フェムト秒レーザー以外のレーザーを使用することも検討する必要がある。

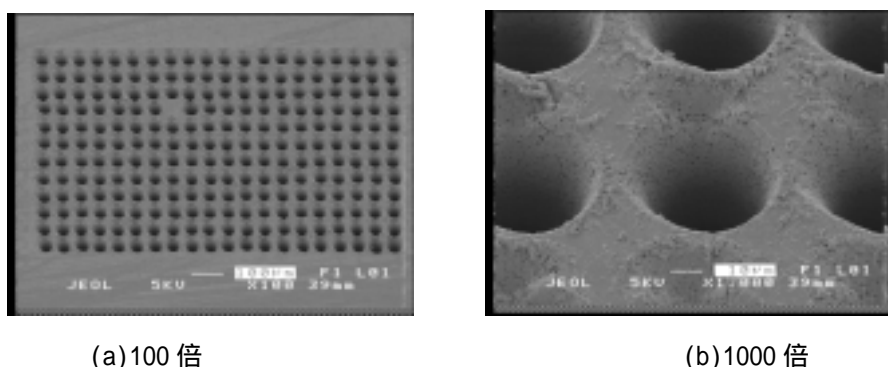


図 34 PET ($t=0.125\text{mm}$)への穴あけ(非貫通)加工結果電子顕微鏡写真

牛乳パック内面への非貫通穴加工

図 35 に示すような牛乳パック内面への非貫通穴加工に関するニーズを得た。穴加工の目的は牛乳パックのピンホール検査用のサンプル作成である。パック紙内面のポリエチレン層のみに穴径 $5\ \mu\text{m}$ の穴をあけ、下層のアルミニウム層を露出する。アルミニウム層が露出することにより、電気的な試験でピンホールの存在を確認できる。加工するにあたってのポイントは、穴径と深さの制御である。加工にはギガワット級高強度パルスレーザー(中心波長 800nm 、パルス幅 50fs 、繰り返し周波数 1kHz)を用いた。穴径は光量とレンズの集光スポット径で、深さは光量と照射パルス数で制御することを試みた。光学吸収型 ND フィルターで光量を調節し、1 パルスあたりのエネルギーを約 0.3mJ とした。NA 0.55 の対物レンズで試料表面に集光し、2 ショット照射して加工した。

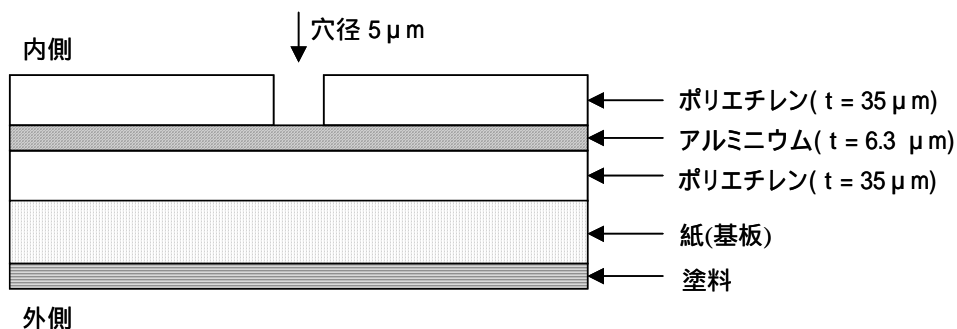
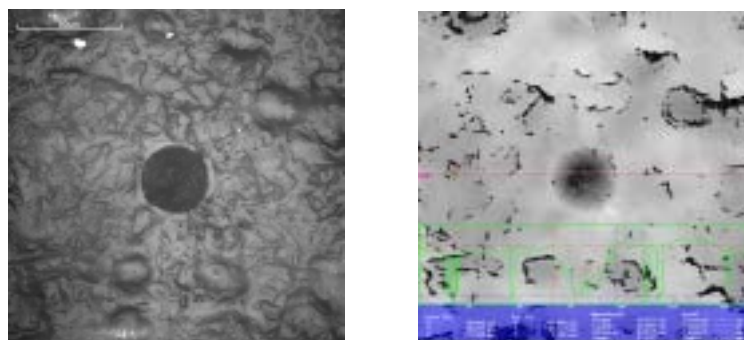


図 35 牛乳パック内面加工要求(断面図)

共焦点顕微鏡で観察した加工痕を、図 36 に示す。(a)は焦点深度無限大の観察画像、(b)は加工穴のプロファイルを示す。加工部は溶融によるダレ等の熱的な影響を受けずに加工されている様子がわかる。加工穴径は $30\ \mu\text{m}$ 、深さは $20\ \mu\text{m}$ であった。目標とする穴径 $5\ \mu\text{m}$ は達成できていないが、今後、光学系を工夫することにより、集光スポット径をさらに小さくすることが可能であると思われる。深さは $35\ \mu\text{m}$ に到達していなかったが、今後、照射パルス数と加工深さの関係を定量的に把握することにより、任意の深さの加工を行うことが可能である。

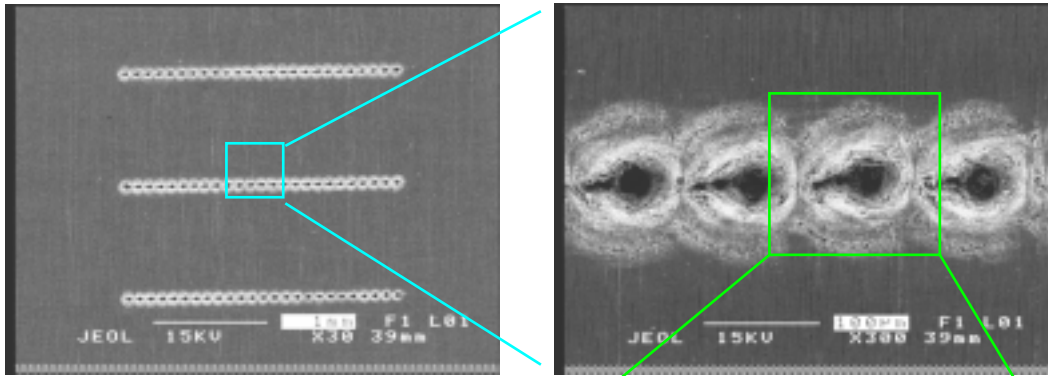


(a)焦点深度無限大画像(穴径約 $30\ \mu\text{m}$) (b)プロファイル(緑の線:最大深さ約 $20\ \mu\text{m}$)

図 36 牛乳パック内面への非貫通穴加工結果(共焦点顕微鏡による観察)

IC リードフレームへの貫通穴加工を想定した金属穴あけ加工

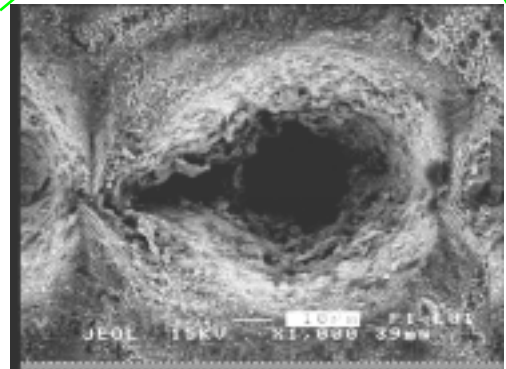
ICのリードフレーム(0.1mm 厚、 0.2mm ピッチ程度)への穴あけ加工のニーズを得た。穴径は 0.1mm 程度で、パターン上の決められた位置に $\pm 0.05\text{mm}$ 程度の精度で高速に穴をあけることが望まれている。ICのリードフレームの材質を想定し、銅板($t = 0.1\text{mm}$)とステンレス板($t=0.1\text{mm}$: ニッケルの代替品)に等間隔の貫通穴加工を試みた。加工には、ギガワット級高強度パルスレーザー(中心波長 800nm 、パルス幅 50fs 、繰返し周波数 1kHz)を用いた。光学吸収型 ND フィルターで光量を調節し、1パルスあたりのエネルギーを 0.15mJ とした。焦点距離 200mm の平凸レンズで試料表面に集光し加工した。一つの貫通穴が孔くまでの時間は、銅が約 0.5 秒(500 ショット)、ステンレスが約 0.25 秒(250 ショット)であった。電動 X-Y ステージで試料を速度 20mm/s で移動することにより、加工点を等間隔(0.1mm ピッチ)に移動した。銅板の加工結果の電子顕微鏡写真を図 37 に、ステンレスの加工結果の電子顕微鏡写真を図 38 に示す。各々の図中(a)は倍率 30 倍、(b)は(a)の四角部分の拡大で倍率 300 倍、(c)は(b)の四角部分の拡大で 1000 倍における写真である。いずれも穴径 0.1mm 程度、間隔 0.1mm で貫通穴加工がおこなわれている。しかし、加工部の拡大図からは、良好な非熱加工であるとは言い難い。エネルギーを過剰に注入した結果、やや熱的な効果が出現している。



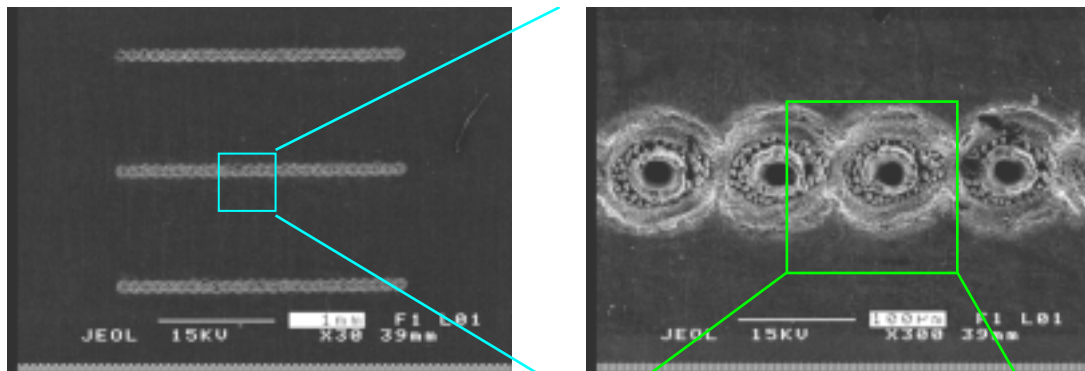
(a)30倍

(b)300倍

図 37 銅板 ($t=0.1\text{mm}$)への貫通穴加工結果(電子顕微鏡写真)



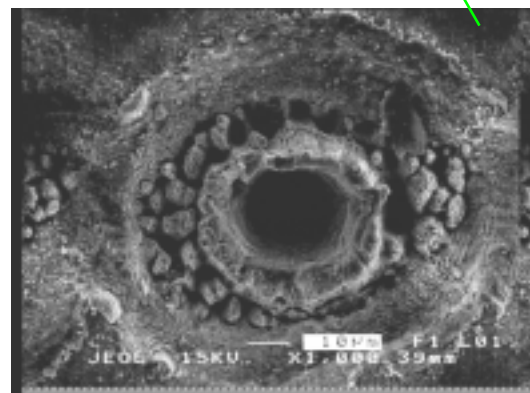
(b)1000倍



(a)30倍

(b)300倍

図 38 ステンレス板 ($t=0.1\text{mm}$)への貫通穴加工結果(電子顕微鏡写真)



(b)1000倍

ガラスの切断加工

レーザー加工に関するニーズ調査で、液晶用ガラス基板(厚さは0.1~0.5mm程度)を非熱レーザー加工切断する要望を得た。従来のレーザーによる熱的な切断加工では、加工部エッジに溶融部が生じ好ましくない。本加工において、留意すべき点は加工速度と切断面の状態であると考えられる。

実験のセットアップを図39に示す。光フェムト秒パルス再生増幅器の出力光(中心波長805nm、パルス幅50fs、繰返周波数1kHz、平均出力620mW)を、焦点距離35mmの平凸レンズで試料表面に集光し、試料を20mm/秒の速度で一次的に移動して試料の切断を試みた。液晶ガラス基板(厚さ0.1~0.5mm)の代替品として、顕微鏡観察用カバーガラス(18×18mm:厚さ0.13~0.16mm)を用いた。

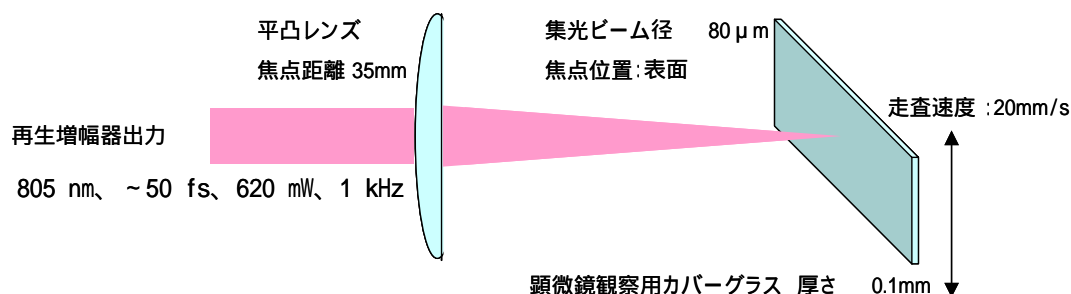


図39 ガラス切断実験のセットアップ

試料切断部は図40に示すような3方向から電子顕微鏡で観察した。観察結果を観察方向Aについては図41、Bについては図42、Cについては図43に示す。

写真からは切断部に顕著な溶融部は認められない。しかし、実物の切断面の触感は滑らかではなく、手で触ると引っかかりを感じた。加工面の凹凸がどの程度なら許容できるのかについては依頼者から詳細な情報を入手する必要がある。

今回は、再生増幅器出力の最大パワー付近の出力で加工し、厚さ0.1mm、距離20mmのガラス加工に2分程度要した。凹凸の少ない加工面を得るためには閾値近傍で加工する方が良いと思われるが、加工時間がかなり長くなることが予想される。今後、加工面の凹凸と加工時間の最適な組み合わせを見つけることが必要である

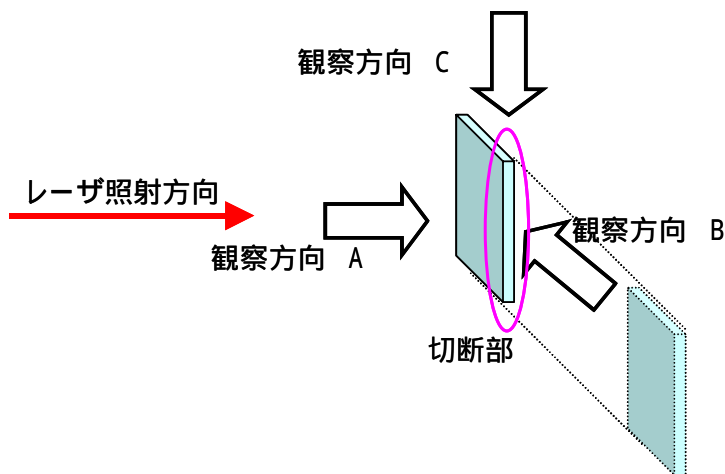


図40 加工結果の観察方向

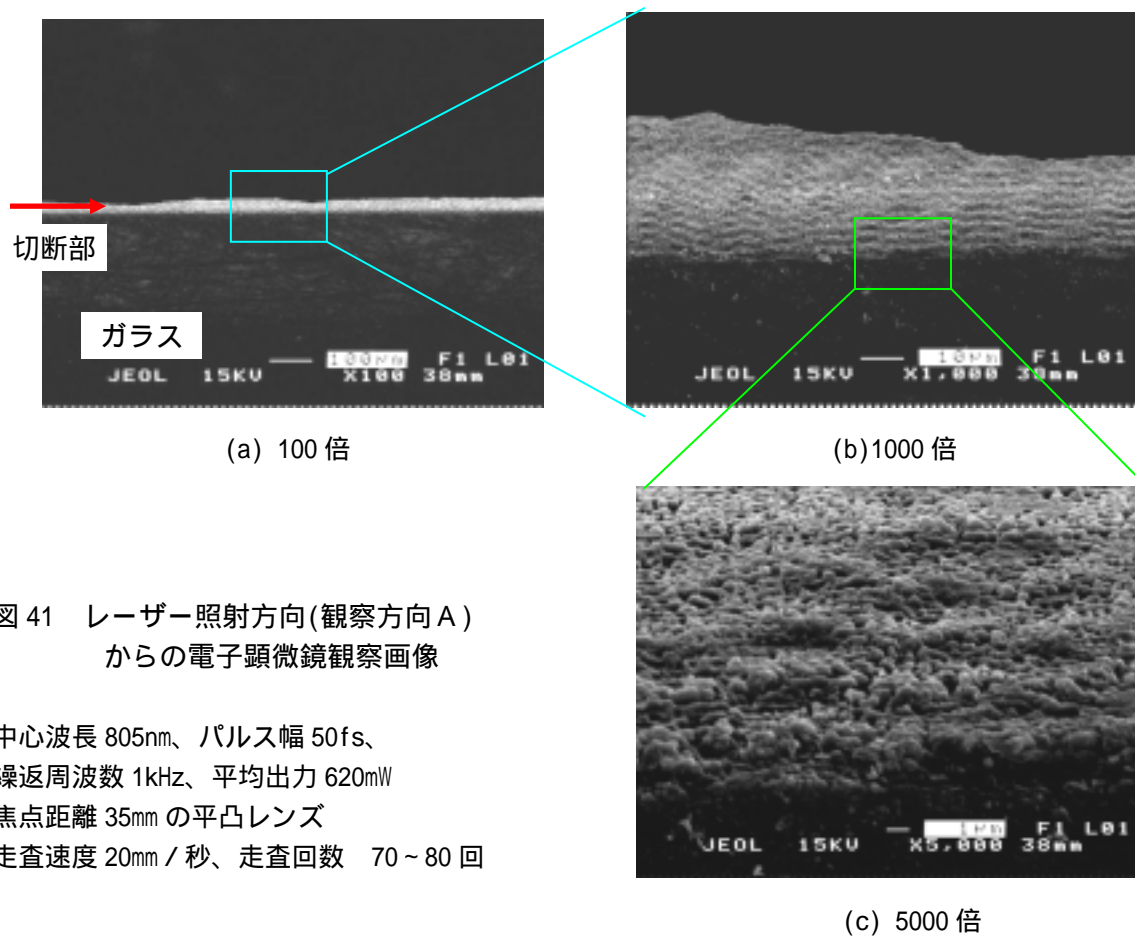


図 41 レーザー照射方向(観察方向 A)からの電子顕微鏡観察画像

中心波長 805nm、パルス幅 50fs、
 繰返周波数 1kHz、平均出力 620mW
 焦点距離 35mm の平凸レンズ
 走査速度 20mm / 秒、走査回数 70 ~ 80 回

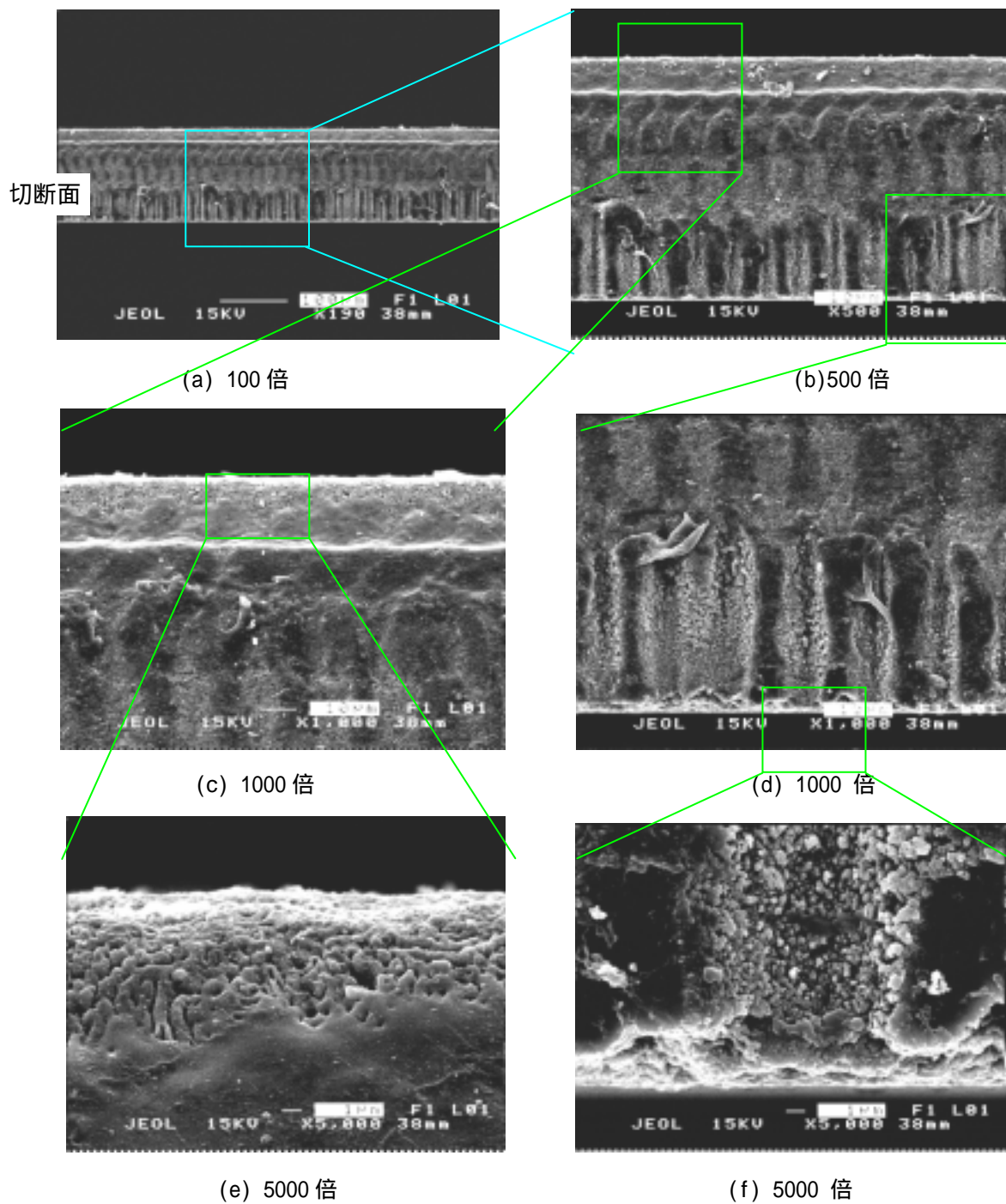


図 42 切断面(観察方向B)からの
電子顕微鏡観察画像

中心波長 805nm、パルス幅 50fs、
繰返周波数 1kHz、平均出力 620mW
焦点距離 35mm の平凸レンズ
走査速度 20mm / 秒、走査回数 70 ~ 80 回

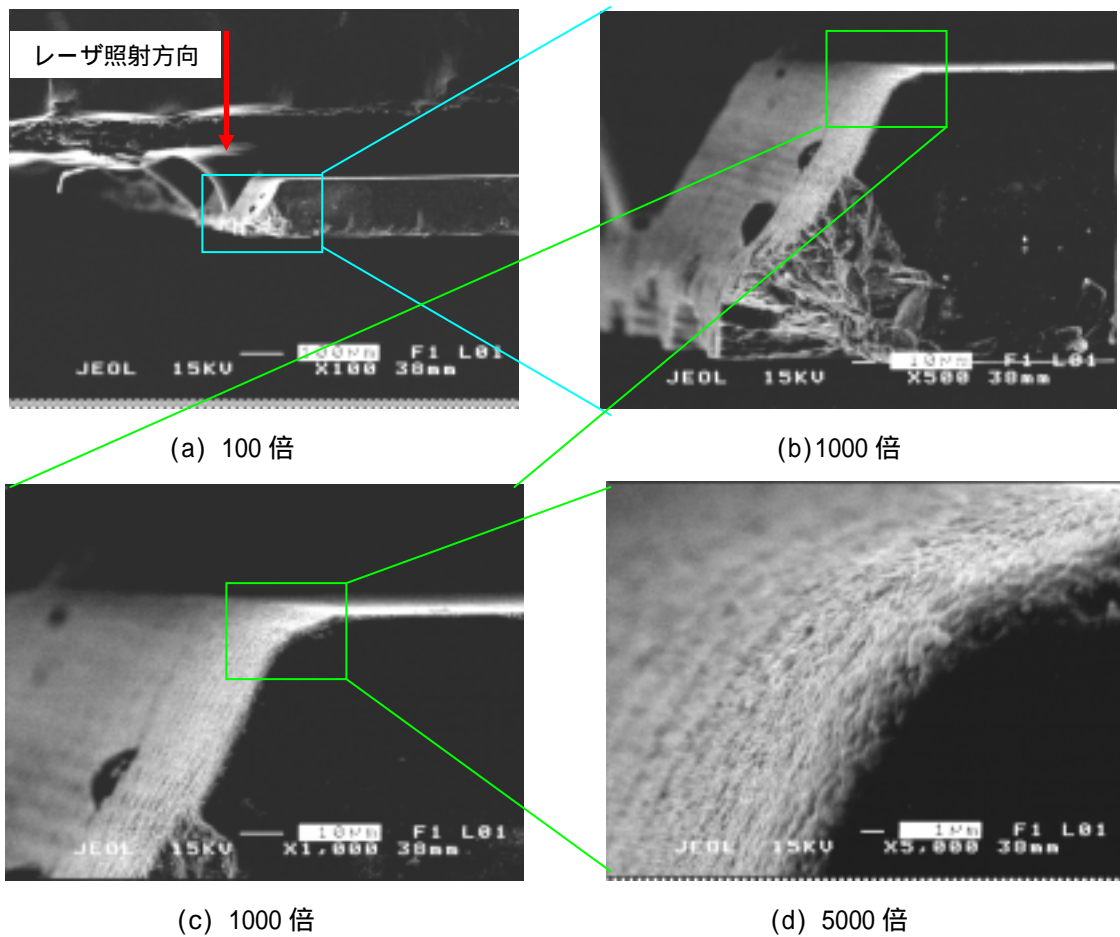


図 43 切断部断面(観察方向C)からの
電子顕微鏡観察画像

中心波長 805nm、パルス幅 50fs、
繰返周波数 1kHz、平均出力 620mW
焦点距離 35mm の平凸レンズ
走査速度 20mm / 秒、走査回数 70 ~ 80 回

発泡誘電体(テフロン)への微細穴あけ加工

近年の携帯情報端末機器の小型化により、同軸ケーブルの径も細くなる傾向にあるが、ケーブルの特性インピーダンスは保持しなくてはならない。そのために、外部導体路と内部導体の間の誘電体の誘電率をより低くする加工が必要になる。現在は、誘電体を発泡化させることにより、ある程度まで誘電率を低くすることができるが、さらに誘電率を低くするために、誘電体中に空洞部を形成することが考えられる。誘電体材料は発泡テフロンであるため、熱影響の少ないフェムト秒レーザーを用いることとし、微細穴加工の形成の可能性を検討した。

再生増幅器出力のフェムト秒レーザーパルス光(中心波長 800 nm、パルス幅 60 fs、繰返周波数 1 kHz、出力 620 mW)を、偏光板の組み合わせで 40 mW まで減光し、焦点距離 50 mm の単レンズで材料表面に集光した。1 回の照射パルス数は 4 パルス(1/250 秒)、一ヶ所につき 25 回(4×25 パルス)照射した。結果を図 44 に示す。穴径は 30~40 μm である。企業側の希望は 10 μm であるので、現段階では仕様は満足できていない。照射パワーやレンズの焦点距離の最適化により、加工穴径を 10 μm に近づけることは可能である。しかし、加工に要する時間が長くなると予想され、加工速度を向上させるための検討が必要である。

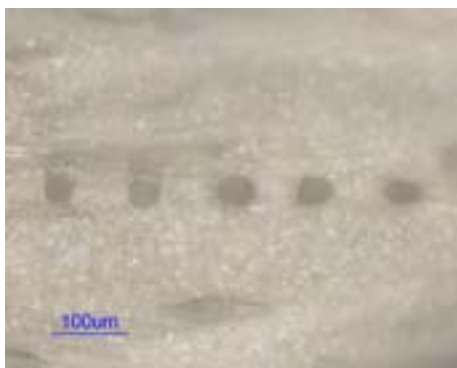


図 44 発泡テフロンへの微細穴加工結果

合成樹脂基板の切断加工

半導体産業の現場で実際に使用されている厚さ約 1 mm の合成樹脂基板の切断加工実験をおこなった。用いたレーザーパルスは、波長 815 nm、パルス幅 50 fs、パルスあたりのエネルギー 0.5 mJ/pulse (ピークパワー: 10 GW)、パルスの繰返し周波数 1 kHz、平均強度 500 mW のチタン・サファイアレーザーの再生増幅パルスである。

このレーザーパルスを焦点距離 100 mm の平凸レンズ及び 8 mm の対物レンズを用いて集光した。図 45 に、フェムト秒レーザーと金属刃(オビのこぎり)による加工面の比較結果の 1 例[図(a)]を示す。フェムト秒レーザーによる加工の方が、明らかに精密な切断加工ができることが示された。また、切断箇所の周辺領域への大きな影響も無く、良好な加工結果が得られたと言える。但し、実用化のためには、集光強度の最適化し、加工時間をあと 40 倍短縮する必要がある。

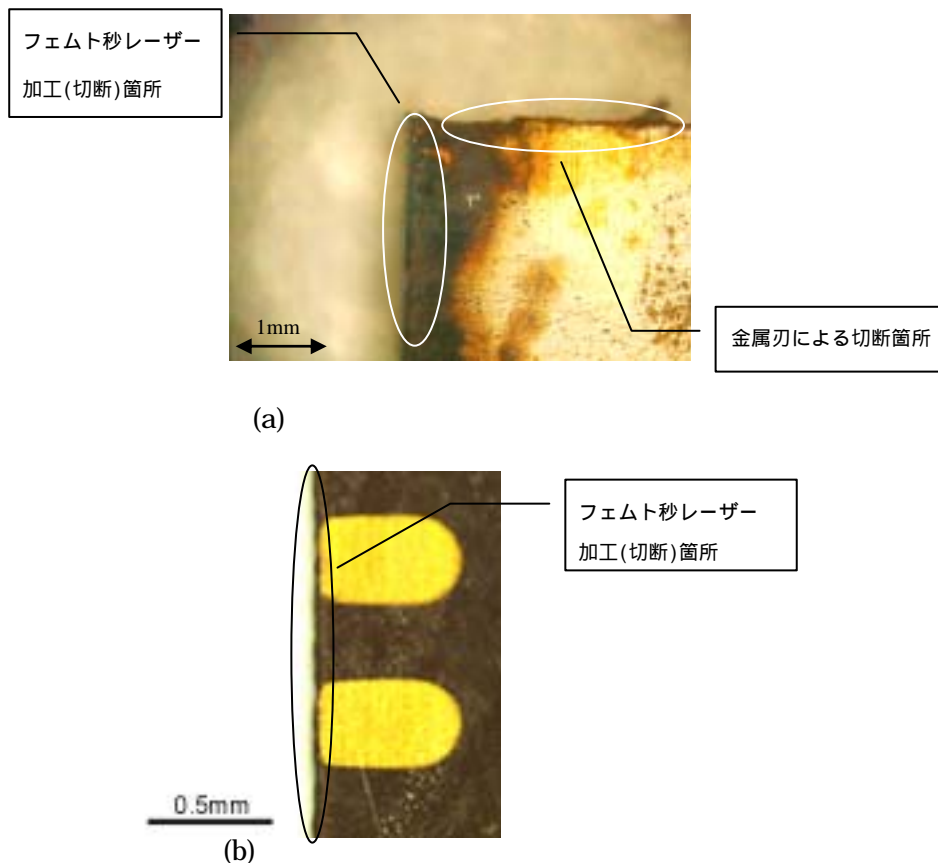


図 45 フェムト秒レーザー光と金属刃を用いた切断加工の比較
 (a) $f=100$ mm 平凸レンズ集光 40 分 (b) $f=8$ mm 対物レンズ集光 40 秒

無線 LAN 端末機器内部に搭載する板金アンテナ(洋白(Cu+Zn+Ni))の加工

再生増幅器出力のフェムト秒レーザーパルス光(中心波長 800 nm、パルス幅 60 fs、繰返周波数 1 kHz、出力 620 mW)で、板金アンテナ材料(洋白(Cu+Zn+Ni))の切断をおこなった。結果を図 46 に示す。切断幅は $100\ \mu\text{m}$ 程度である。照射パワーが増加するに従い、切断幅は広がるが、裏面まで確実に切断される。加工をビームの 1 回走査で完了させようとする、 $20\ \mu\text{m}/\text{秒}$ という極めて遅い速度に設定しなければならない。

照射パワー 300 mW で角穴をあけた。切断速度(材料移動速度)は、加工によって材料の裏面にレーザー光が透過し続けるのが確認できる速度($20\ \mu\text{m}/\text{sec}$)とした。結果を図 47 に示す。加工後に角穴に圧力をかけて抜く行為をおこなわないと、開口しなかった。加工部も変色を伴っており、プレスによる一括加工に比べてもフェムト秒レーザー加工の優位性は必ずしも多くはない。加工後のキレイさ、加工時間、かかる費用を、プレスによる一括加工と比較して、フェムト秒レーザー加工が生産に導入可能かどうかを検討する必要がある。

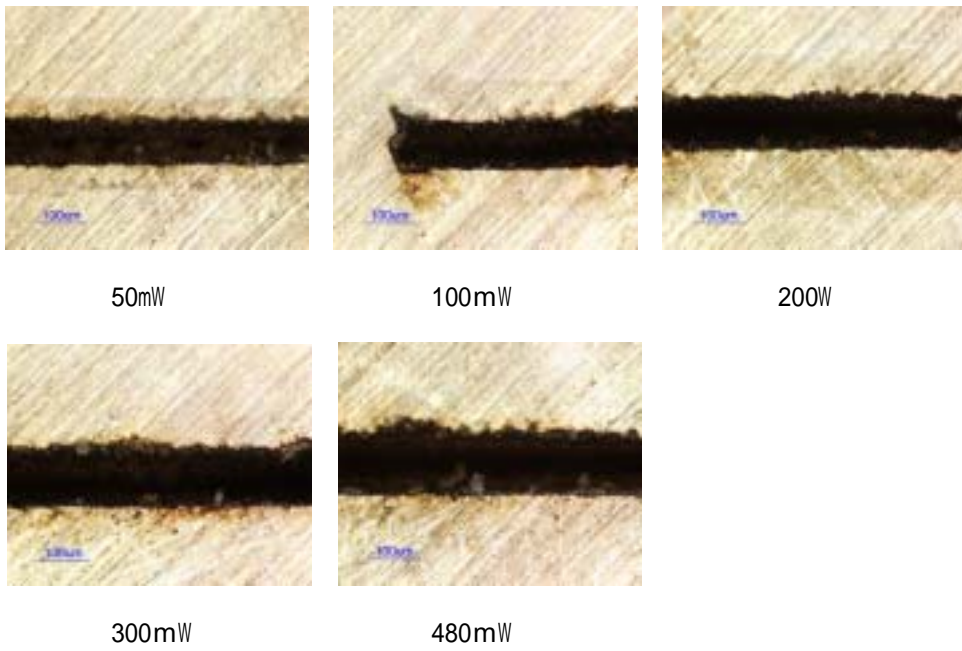


図 46 洋白(Cu+Zn+Ni)の切断

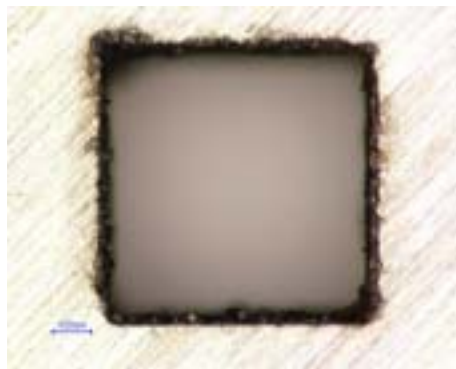


図 47 各穴あけ加工結果(照射パワー300 mW、 $v=20 \mu m$)

グリーンナノ秒レーザーによる材料加工実験

本事業で開発されたグリーンナノ秒レーザーによる加工は、既存産業における広い応用が期待される。そこで、グリーンナノ秒レーザーを使った加工実験例を示すことにより、地域企業への展開を図ることとした。

ガラス板への穴あけ

レーザー加工に関するニーズ調査で、ガラス(厚さ 1 mm)への貫通穴($0.7\text{ mm}-0+0.005\text{ mm}$ 、ピッチ $4.6\text{ mm}\pm 0.003\text{ mm}$)加工の要望を得ていた。これまでの知見から、加工対象の厚さを考慮するとフェムト秒レーザーでの加工は困難であると考えられる。そこで、グリーンナノ秒レーザーで加工を試みることにした。実験の様子を図 48 に示す。グリーンナノ秒レーザー(波長 532 nm、パルス幅 27 ns、繰返周波数 5 kHz、平均出力 8.5 W)を、焦点距離 150 mm の平凸レンズで試料表面に集光、1 秒間照射した。結果を図 49 に示す。(a)は、レーザー照射方向から観察した図、(b)は反対側から観察した図である。貫通はしているが、入射口の径と出射口の径が異なっており、穴が円錐状に空いていることが推測される。



ガラス板への貫通穴加工

図 48 ガラス加工実験の様子

また、加工穴周辺にはクラックが入っており、急激な入熱が起きていると考えられる。現状では、加工ニーズに応えられる加工結果はない。現在、光量を調節する減光器を準備しているので、準備ができ次第、照射パワーの変化による加工痕の変化に関する実験をおこなう予定ある。

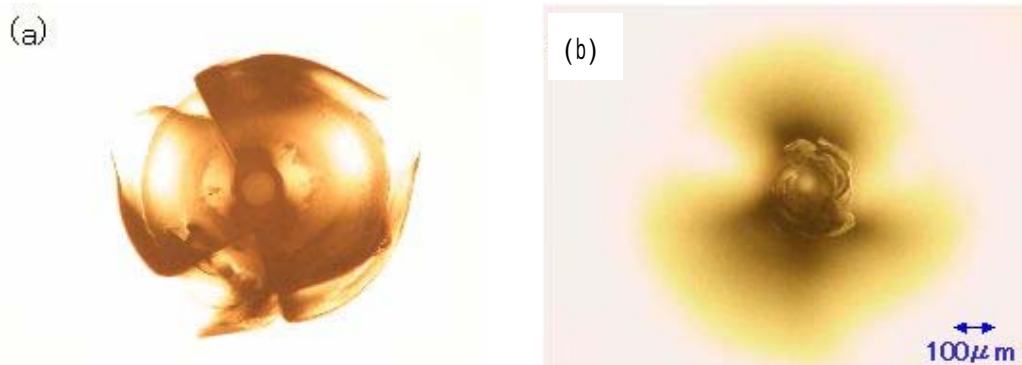


図 49 ガラスへの貫通穴加工実験結果

チップソー超硬チップのダイヤモンド部の溝切り

チップソー超硬チップは図 50 に示すように、タングステンカーバイトとダイヤモンドが層状に作られている。前年度にはフェムト秒レーザーで加工した。超硬チップの厚さ 2 mm は、フェムト秒レーザーにとっては厚すぎるために、加工時間に膨大な時間がかかる。そのため、実用化されるには至らなかった。

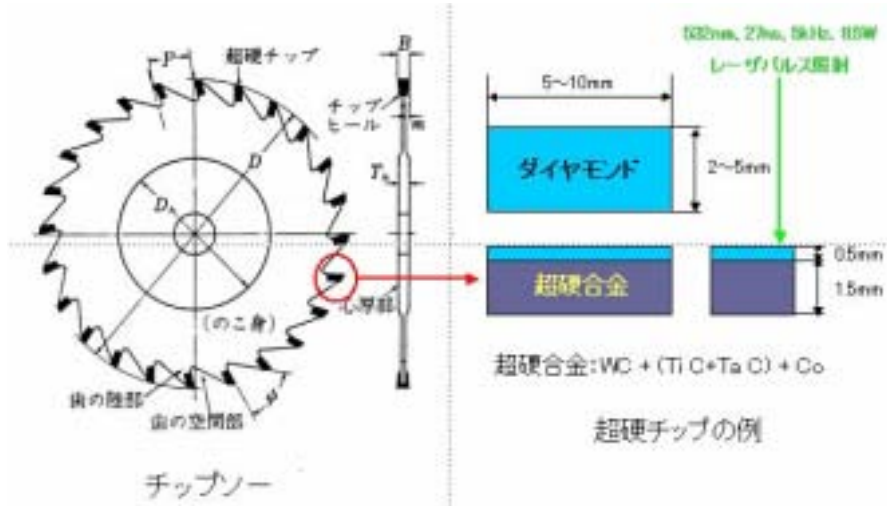


図 50 チップソーに使われている超硬チップの例

今回の実験では、グリーンナノ秒レーザー(波長 532 nm、パルス幅 27 ns、繰返周波数 5 kHz、平均出力 8.5 W)を、焦点距離 150 mm の平凸レンズで試料表面に集光し、20 mm / 秒の速さで 1 回走査した。

図 51 はその結果を示す。切断はできなかったが、溝切幅は 200 μm 程度、深さは光学顕微鏡の合焦点位置の変化から約 100 μm と推測される。現状では、加工にあたっては移動ステージの準備が充分でなく、最適な加工条件を求めるまでには至っていない。しかし、加工結果及び加工部の目視から切断加工は可能であると判断できる。今後、グリーンナノ秒レーザーの加工実験に必要な実験環境を整備して、さらに実験を継続する予定である。



図 51 超硬チップ材料(ダイヤモンド層)への溝切加工
(溝深さ 100 μm は実体顕微鏡の合焦点位置の変化量から推測)

射出成形金型用超硬材料(タングステン・カーバイト)への穴あけ及び切断加工

本事業の成果の一部であり、前年度までに整備された YAG-SHG レーザーを用いて射出成形金型用超硬材料への穴あけ及び切断加工を試みた。これまでフェムト秒レーザーによる加工を試みてきたが、加工に要する時間が長いという問題があった。

地域企業から提供された金型材料(タングステンカーバイト、厚さ 5 mm)に穴あけ加工をおこなった。YAG-SHG レーザー光(波長 532 nm、パルス幅 27 ns、繰返周波数 5 kHz、最大平均出力 11 W)

を偏光板の組み合わせによってパワーを変化させ、焦点距離 150 mm の平凸レンズで試料表面に集光した。照射時間は 10 秒間とした。加工結果を図 52 に示す。

照射パワーが 0.5 W の時は表面に傷がつく程度であるが、1 W を超えたあたりから確実に穿孔されている。照射パワーが増加するに従い、穴開口径も大きくなり(1 W の時は 50 μm 、10 W では 200 μm)、周辺部への熱的影響部も拡大する。照射時間を長くしても厚さ 5 mm を貫通することはできなかった。

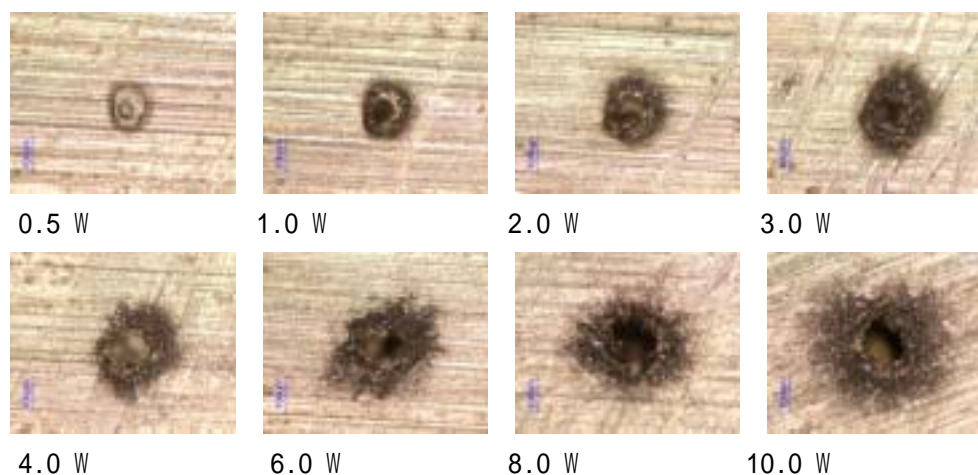


図 52 超硬材料(タングステンカーバイト)への穴あけ加工

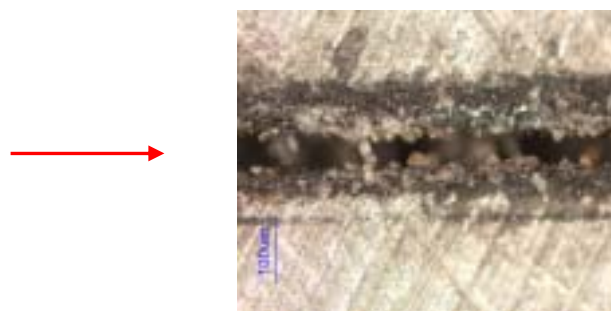


図 53 レーザ照射側からみた切断部(3.0 W、 $v=1$ mm/s、20 走査)

次に、レーザー光を走査して切断加工を試みた。照射パワーは前述の実験結果から、周囲への影響が少なく確実に加工されるとできると判断できる 3.0 W 程度とした。焦点距離 150 mm の単レンズで材料表面に集光し、1 mm/秒の速度で 20 回走査した。加工結果を図 53 に示す。材料厚さ 5 mm は切断できなかったが、加工幅 100 μm 程度で溝切り加工された。同一箇所を何回も走査したために加工部周辺は熱的影響部が形成され、滑らかさやキレイさの観点で問題が残る。今後、この問題を解決するために、アシストガスの利用等の加工補助環境を検討する予定である。

YAG-SHG レーザーによる透明材料(合成石英)の加工

透明材料の表面または内部に液体が流れる微細な流路を作成できると、産業への応用範囲が拡大することが知られている。これまでのフェムト秒レーザーによる加工では、材料の表面にレーザーで直接滑らかな溝を彫ることは難しかった。そこで、YAG-SHG レーザーで透明材料(合成石英)への加工を試みて、流路加工の可能性を探った。

YAG-SHG レーザー(波長 532 nm、パルス幅 27 ns、繰返周波数 5 kHz、最大平均出力 11 W)を、

焦点距離 150 mm の平凸レンズで試料表面に集光し、1 mm/秒の速さで1回走査した。予備実験から加工閾値は 7 W 程度であったが、照射パワーは余裕を見て 11 W とした。結果を図 54 に示す。表面に、幅 300 μm 程度・深さ 400 μm 程度の断面形状 V 字型の溝が形成された。しかし、加工部分の平滑性があまり良くないため、今後、加工条件の最適化を予定である。

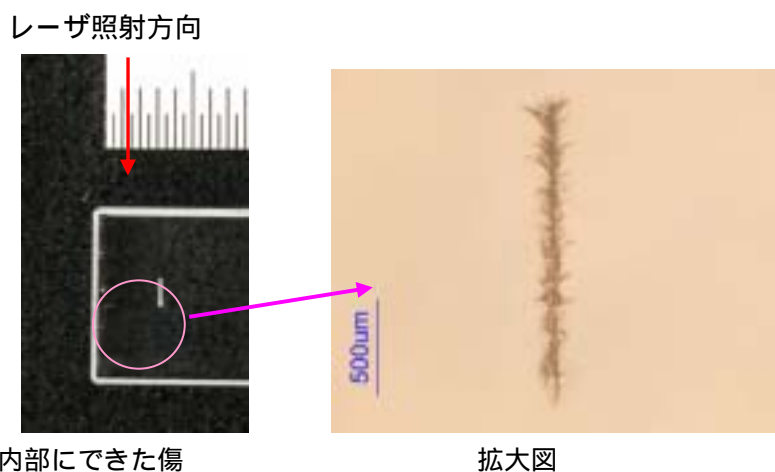
次に、透明材料内部の加工を試みた。レーザー光を、合成石英ブロック (20 \times 10 \times 5 mm) の内部中央付近に焦点距離 50 mm のレンズで集光し、照射パワーを 0 W から徐々に増加させた。パワーが 6.6 W に達した時、石英内部の集光点付近に突然傷が生じた。加工結果を図 55 に示す。表面は無傷で、内部の傷の長さは 1.5 mm 程度である。傷の部分が空洞であるかどうかは確認できない。YAG-SHG レーザーで透明材料の内部のみが加工できることが確認できた。今後、傷の長さの変化、任意の位置への加工、他の透明材料に対しての加工可能性について実験を進める予定である。



レーザー照射側から見た図

横から見た図

図 54 合成石英表面への溝切り加工(11.0 W、 $v=1$ mm/s、1回走査)



内部にできた傷

拡大図

図 55 合成石英内部への加工(6.6 W、焦点距離 50 mm 単レンズ)

生体材料の加工

浜松医科大学との技術交流会での情報などから、生体材料加工への応用可能性の検討が有意義であると判断したので、生体材料を加工した。以前、生体軟組織の例として豚肉のフェムト秒加工をおこなったので、今年度は硬組織の例として鳥の骨を選択した。光源として、YAG-SHG レーザー(波長 532 nm、パルス幅 27 ns、繰返周波数 5 kHz、最大平均出力 11 W)と、再生増幅器出力のフェムト秒レーザーパルス光(中心波長 800nm、パルス幅 60 fs、繰返周波数 1 kHz、出力 620 mW)を用いて、加工の違いを検討した。光平均出力 500 mW 時の加工結果を図 56 に示す。

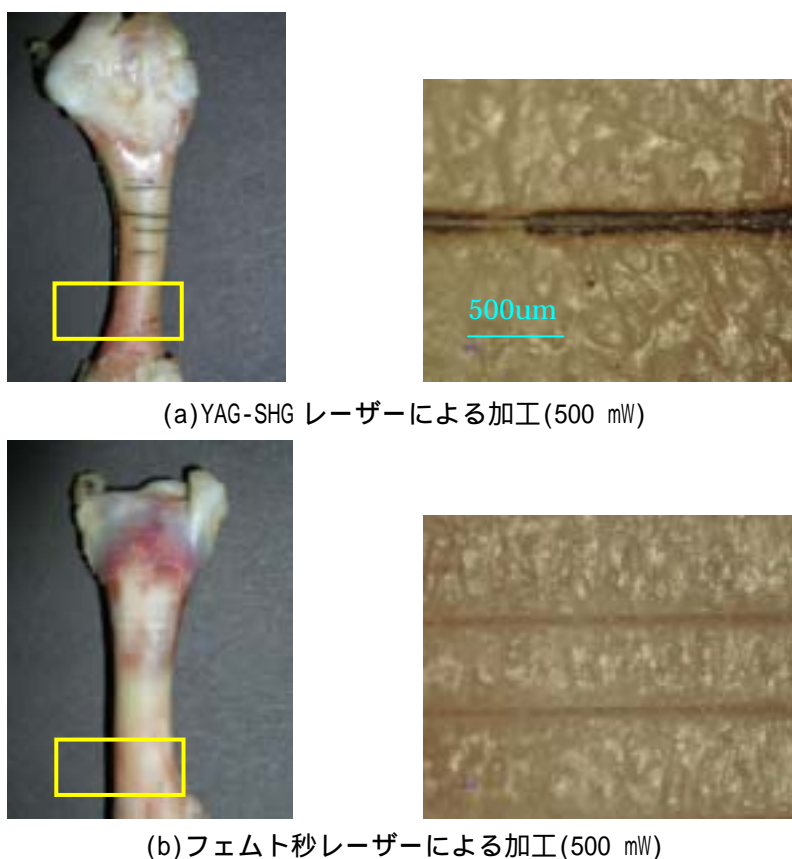


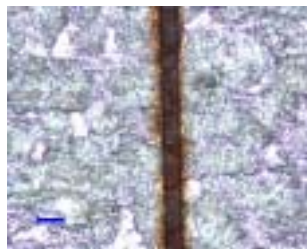
図 56 骨(トリ)表面への溝切加工

YAG-SHG による加工では、熱影響による焦げが顕著に観察される。溝幅は約 $100\ \mu\text{m}$ 、溝の深さを共焦点顕微鏡で測定したところ $30\ \mu\text{m}$ 程度であり、見た目ほど深さ方向に加工されていない。フェムト秒レーザーによる加工では溝幅約 $80\ \mu\text{m}$ 、溝の深さを共焦点顕微鏡で測定したところ $100\ \mu\text{m}$ 程度であった。熱的な影響はほとんど認められず、生体に対して最小の影響で加工がおこなえることが推測できる。しかし、フェムト秒レーザーによる加工は、その出力や特性上、材料表面近傍への加工に限定される。よって、骨の表面を粗面に加工して、生体外材料と生体との接合力を強化する等の応用が考えられる。今後、さらに医用分野との情報交換を進め、加工の有用性を検討したい。

地域企業との共同実験

フェムト秒レーザー加工に興味を示す地域企業が現れ、今後フェムト秒レーザーを用いた加工技術を開発することの可否を検討していくうえで、実際の加工実験を体験しフェムト秒レーザー加工の「感触」を得たいという希望が寄せられた。そこで、地域企業の意向に沿った実験を共同でおこないながら、将来的な加工実験計画を立てることとした。共同実験の第一歩として、ステンレスの加工実験をおこなった。

フェムト秒レーザーの再生増幅器出力光(800nm、パルス時間幅 60fs、繰返周波数 1kHz、平均出力 600mW(0.6mJ/pulse))を ND フィルタや偏光光学素子によって光量の制御をおこない、平凸レンズ($f=50\text{mm}$)で試料表面に集光照射する。電動 XYZ ステージを駆動し、設置した試料を移動することによって加工点を移動する。試料は地域企業が用意した SUS304($50 \times 100 \times 10\text{mm}$)を用いた。平均出力及び移動速度を変化させ溝切加工をおこない、加工痕を光学顕微鏡で観察する。加工結果の代表例として、移動速度 0.2mm/sec、平均出力 10mW($10 \mu\text{J/pulse}$ 、 $5.2 \times 10^3 \text{ W/cm}^2$)の時の加工結果を図 57(a)に示す。また、移動速度 1mm/s、平均出力 10mW の時の加工結果を図 57(b)に示す。今回の共同実験の主目的は、地域企業に加工の「感触」体験してもらうことであった。この目的に関しては、ほぼ達成されたが、次回以降は具体的な加工を目標に掲げ、各加工パラメータとの関係を検討する予定である。



(a) 移動速度 0.2mm/s 平均出力 10mW



(b) 移動速度 1mm/s 平均出力 10mW

図 57 ステンレス溝切加工 試加工

フェムト秒レーザー加工事例データベース整備

本事業で蓄積してきた加工成果やノウハウを整理・統合して、新規産業創出のための基盤技術として整備・統合し、データベースを整備する。

蓄積してきたフェムト秒レーザー加工事例のデータベースの整備を行った。図58に示すように、webブラウザにより閲覧できる形式を採用し、加工対象又は加工種類を選択して、目的とする加工事例に到達できるようにした。事業の当初の目標であるデータベースの構築がほぼ完了した。

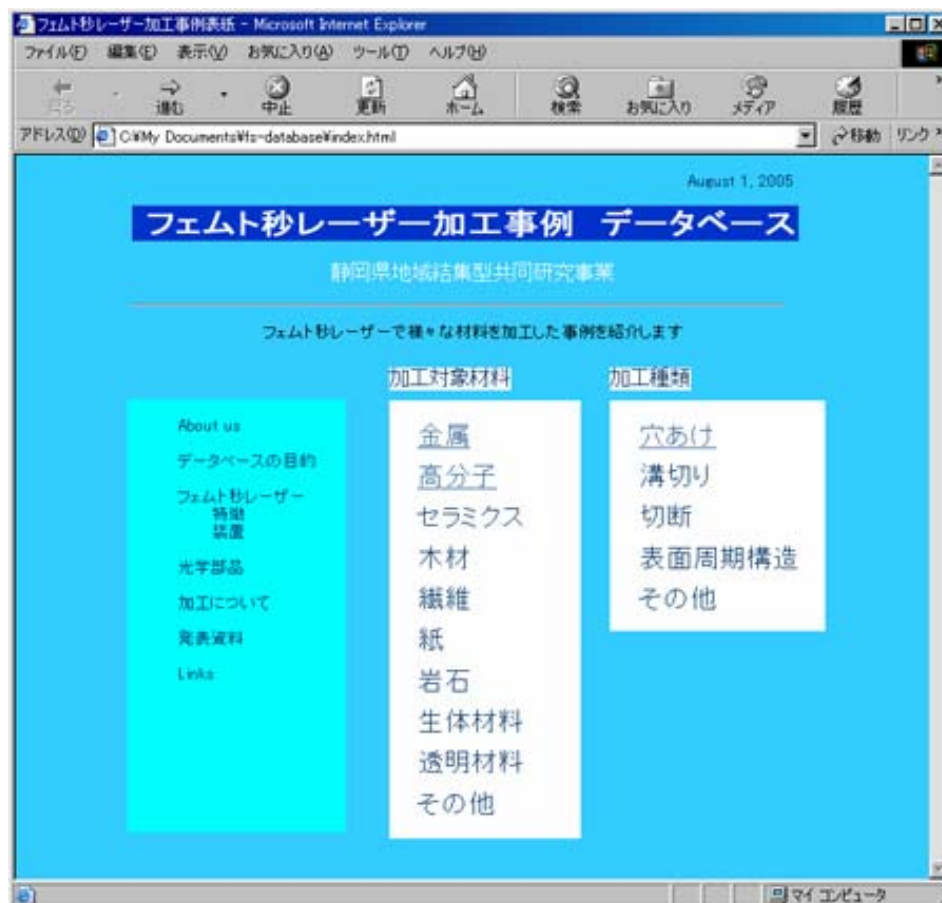


図 58 フェムト秒レーザー加工情報データベースのトップページ

フェムト秒レーザ加工を支える周辺技術

A. ナイフエッジ法によるビームプロファイル測定

将来構築を予定している加工情報データベースが有用なものとして利用されるためには、加工条件を定量的に明確に記述することが求められる。前年度までの予備的な加工実験の次のステップとして、加工時の様々なパラメータを定量的に把握することが必要である。レーザーフルエンス(単位面積当たりのレーザーエネルギー)は、加工に影響を与える重要なパラメータの一つである。フルエンスの算出にはビームの断面積が必要である。加工はレーザービームをレンズで集光した焦点近傍で行うので、焦点付近のビーム断面積を実験的に求めた。

ナイフエッジ法を参考にして、ビームプロファイルの推定を行った(図 59)。リジェンアンプの出力光を ND フィルタで減光し、平凸レンズ($f=200\text{mm}$)で集光する。焦点位置の前後数点においてビームの遮蔽量を変化させ、パワーメータでの受光量を測定する。ビームをガウシアンビームであると仮定し、測定値を任意の指数関数にあてはめる。

最適なあてはめパラメータを基にして、受光パワーが最大値の $1/e^2$ になる位置をビーム径と見なす。

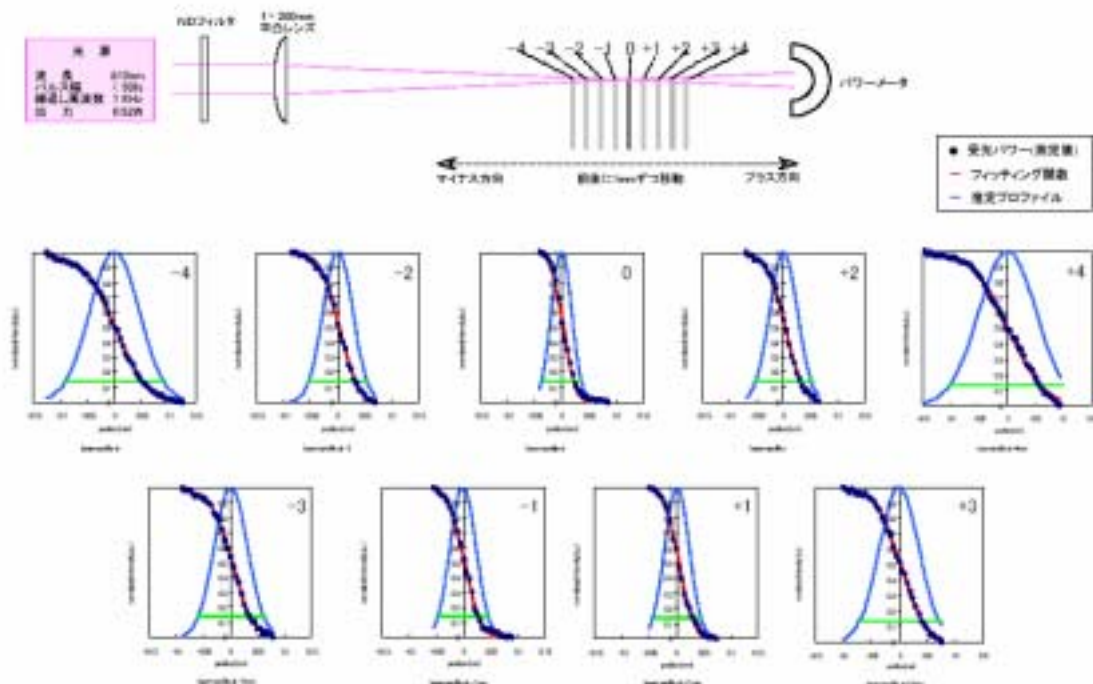


図 59 ナイフエッジ法によるビームプロファイルの推定

焦点からの距離とビーム径の関係を次の図 60 に示す。右側の図は、焦点深度を視覚的に把握するために、焦点からの各位置におけるビーム径を光軸からの距離として表した。

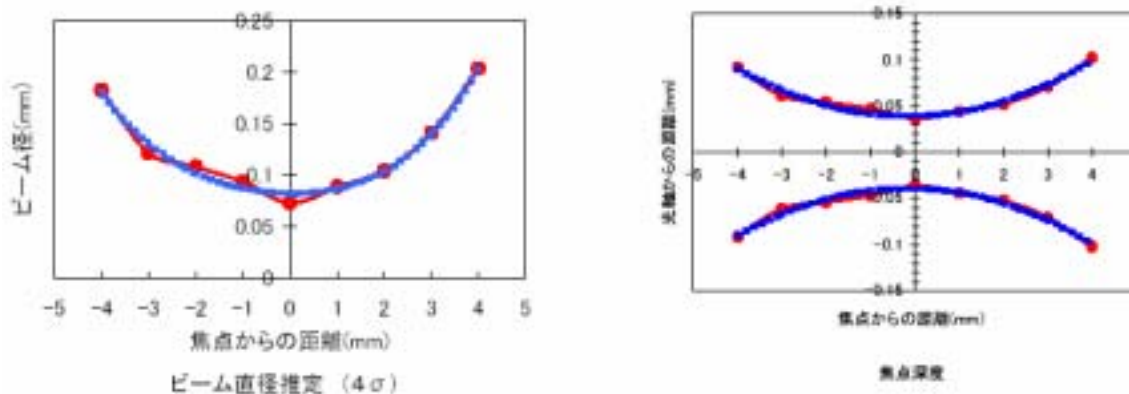


図 60 ナイフエッジ法で推定されたビームプロファイル

実験結果から、現在我々が加工に使っているレーザーのビーム集光径は約 70~80 μm であることが確認できた。

B. 加工の「場」における超短パルスレーザーパルス幅の測定

レーザーで加工を行う時、加工をする“場”においてエネルギーを制御する。通常は ND フィルタやレンズを用いて制御することが多い。しかし、高強度超短パルスレーザーは、いろいろな媒質を通過することによりパルス幅が伸展する。パルス幅は重要な加工のパラメータの 1 つであるため、加工の“場”で、パルス幅を正確に把握することが必要である。そこで、GW 級高強度超短パルス(フェムト秒レーザーパルス)が ND フィルタやレンズの基盤材料であるガラスを透過した時のパルス幅の変化を計測する。

実験のセットアップを図 61 に示す。ガラスが存在しない状態(normal)から、厚さ 1mm のガラスを 1 枚ずつ挿入し、スキャニングオートコリレータでパルス幅を計測した。

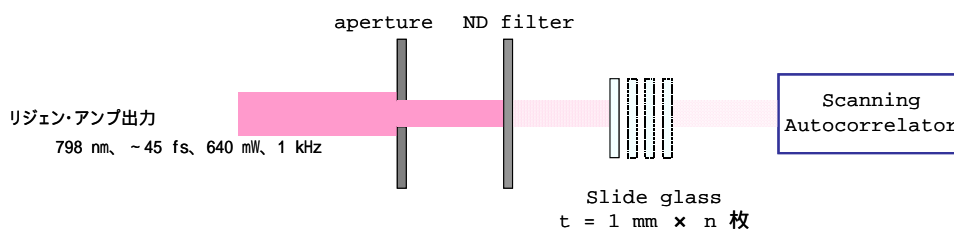


図 61 フェムト秒レーザーのスライドガラス透過によるパルス幅変化
実験セットアップ

測定結果を図 62 に示す。ガラスが存在しない状態のパルス幅は計測値で 60fs、補正係数を乗じて 42fs である。この値はシングルショットオートコリレータで測定した値にほぼ等しい。挿入するガラスの枚数が増加するに伴い、パルス幅が伸長する。加工の実務上必要とされる ND フィルタや単レンズ等(厚さ 3~5mm 程度)を挿入することにより、元のパルス幅に比べて 20%程度伸長する。現状では、この程度のパルス幅の伸長が加工結果に大きく影響をすることは認められないが、今後はパルス幅が加工結果に及ぼす影響の度合いを定量的に評価することが必要である

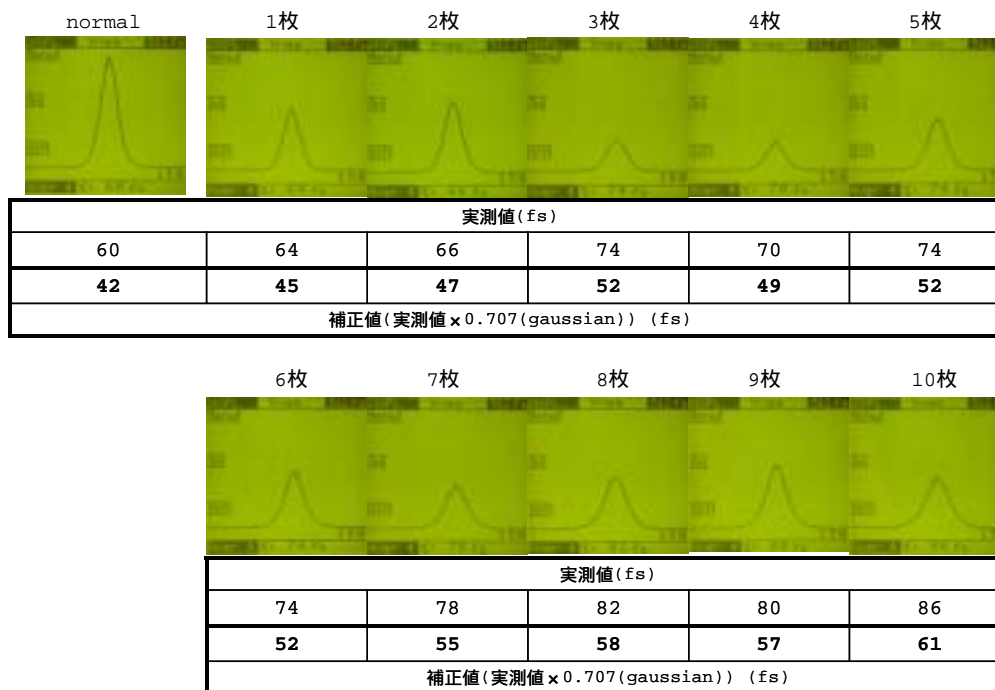


図 62 スライドガラスを透過した時のフェムト秒レーザーパルス幅の変化

C. フェムト秒レーザー加工結果に対する加工雰囲気の影響

フェムト秒レーザーの再生増幅器出力光を大気中でレンズで集光すると集光点近傍で白色光を生じる。これまでの実験から、この白色光が加工結果に少なからず影響を及ぼしていることが予想されていた。そこで、加工雰囲気の圧力が加工結果に及ぼす影響を検討するために、真空中で加工をおこなうことを計画した。簡便な小型真空チャンバーを整備し(図 63)、ドライスクロールポンプを用いて中真空(到達雰囲気圧力 7Pa)を得た。



図 63 整備した小型真空チャンバー

(ア) フェムト秒レーザー集光部の雰囲気圧力による違い

フェムト秒レーザー光の集光点近傍の様子の雰囲気圧力による違いを観察した。フェムト秒レーザー再生増幅器出力光(中心波長 800nm、パルス幅 60fs、繰返周波数 1kHz、出力 600mW(0.6mJ/pulse))を $\lambda/2$ 波長板と偏光ビームスプリッタで光量を制御し、焦点距離 150mm の

平凸レンズで集光した。図 64 に集光点の雰囲気圧力が(a)大気圧、(b)10Pa、(c)7Pa の時の集光点近傍の様子を示す。撮影はデジタルカメラ(F1.8、露光時間 1sec)でおこなった。大気圧では白色に発光していた集光点近傍が、圧力が低くなるに従って、紫、無色に変化することがわかる。フェムト秒レーザー光のみでの加工をおこなうためには、雰囲気をある程度の圧力まで下げることが必要である。

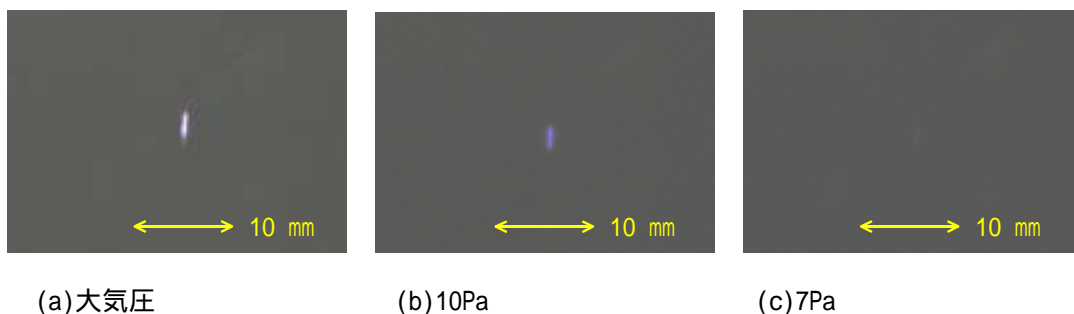


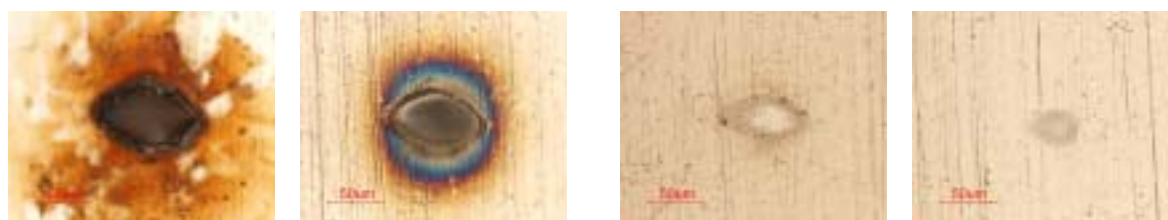
図 64 雰囲気圧力によるレーザー集光部の様子(レーザー光は図中の上から下へ進行し、焦点距離 150mm の平凸レンズで集光、観察位置は全て同じ)

(1) ステンレス加工実験

加工雰囲気圧力を変化させ、ステンレス加工実験(穴あけ、溝切り)をおこなった。フェムト秒再生増幅器出力光(中心波長 800nm、パルス幅 60fs、繰返周波数 1kHz、出力 600mW(0.6mJ/pulse))を $\lambda/2$ 波長板と偏光ビームスプリッターで光量を制御し、焦点距離 150mm の平凸レンズで集光した。

穴あけ加工の結果を図 65 に示す。平均出力は 10mW(10 μ J/pulse)とし、照射パルス数と雰囲気圧力を変化させた。図中、(a)は 1000 パルス照射、大気圧、(b)は 1000 パルス照射、7Pa、(c)は 2 パルス照射、大気圧、(d)2 パルス照射、7Pa の時の、実体顕微鏡写真である。

大気圧での 1000 パルス照射加工では加工部エッジの溶融・変色や加工周辺部の汚れが目立つが、7Pa まで圧力を下げると加工エッジ、周辺部とも綺麗である。2 パルス照射時は、プラズマの発生が少ない圧力 7Pa における加工痕の方が小さく、フェムト秒レーザー光のみで加工されていることが推測できる。



(a)大気圧 1000pulse (b)7Pa 1000pulse (c)大気圧 2pulse (d)7Pa 2pulse

図 65 ステンレス穴あけ加工 加工雰囲気圧力による違い (平均出力 10mW)

次に、溝切り加工の結果を図 66 に示す。平均出力を 10mW(10 μ J/pulse、 1.56×10^3 W/cm²)、2mW(2 μ J/pulse、 0.31×10^3 W/cm²)とし、雰囲気圧力を変化させた。レーザー光は 2mm/s の速度で、図中水平方向に走査した。図中、(a)は 10mW、大気圧、(b)は 10mW、7Pa、(c)は 2mW、大気圧、(d)2mW、7Pa の時の、実体顕微鏡写真である。

写真では倍率が小さいために明確には判別できないが、照射光の偏光方向(図中水平)に対して垂直な方向に、1 μ m 以下程度の周期的な構造が形成されている。平均出力が 10mW(10 μ J/pulse、 1.56×10^3

W/cm²)、2mW(2μJ/pulse、0.31×10³ W/cm²)のいずれの時も、大気圧における加工より 7Pa における加工の方が加工エッジ部、周辺部の変色・汚れが少ない。また(a)と(b)を比べると、(a)大気圧における加工の方が加工痕の深さが深いことが、顕微鏡観察時の焦点位置の変化量からわかる。

フェムト秒レーザー加工では、穴あけのような閾値をある程度超えたパワー密度で加工する場合も、微細周期構造が形成される閾値近傍のパワー密度で加工する場合も、加工雰囲気気圧力の制御が加工結果に影響を及ぼすことが確認できた。今後、空気を別の不活性ガスに置き換えて雰囲気気圧力の制御をおこない、加工への影響を調べる予定である。

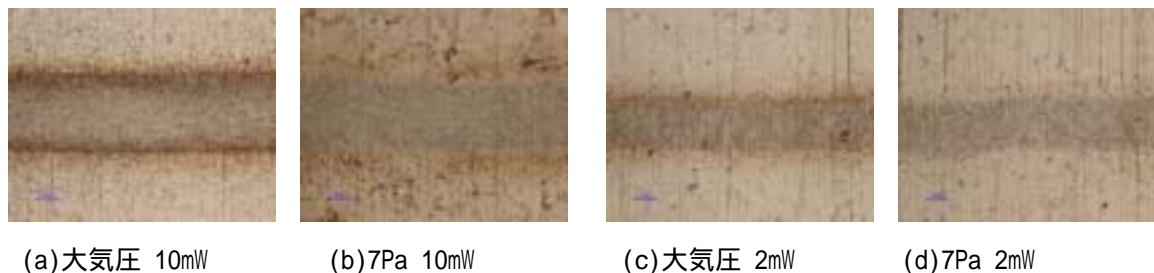


図 66 ステンレス溝切加工(表面微細周期構造)
加工雰囲気気圧力による違い (走査速度 2mm/s)

D. 加工パラメータ(集光スポット径)の定量化

実用的な加工実験をおこなっていく上で、加工パラメータとして、特に、集光点(集光スポット径)の大きさをできるだけ正確に把握することが重要である。これまで集光点のスポット径はナイフエッジ法により測定していたが、今回は CCD カメラを使ったビームプロファイラを用いて改めて測定した。測定セットアップを図 67 に示す。フェムト秒レーザー再生増幅器出力光(中心波長 800nm、パルス幅 60fs、繰返周波数 1kHz、出力 600mW(0.6mJ/pulse))を、ND フィルタで光量調節をおこない、集光用レンズ(図中灰色)で集光する。集光点のビームプロファイルを広大(今回は約 8 倍)後、CCD カメラで受像しパーソナルコンピュータで強度分布を解析してスポット径(1/e²)を求める。集光用レンズとして、平凸単レンズ(f=50、100、150、200、300mm)、及び色消しレンズ(f=100,150,200)を選定し、各々の集光スポット径と、集光スポット面積を算出した。測定・計算結果を表 1 示す。

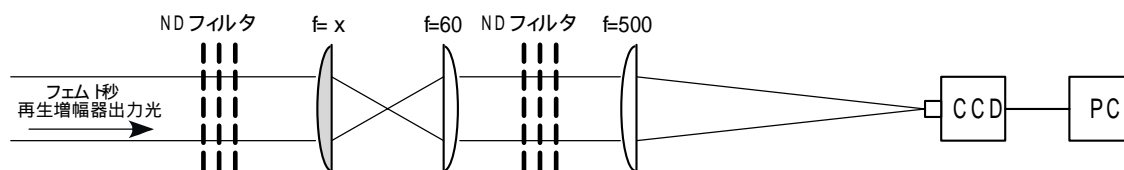


図 67 フェムト秒レーザーの集光スポット径 測定セットアップ

表 1 集光レンズの f ナンバーと集光スポット径及び集光点面積

f	集光スポット径(μm)		集光点面積 (cm ²)	
	単レンズ	色消レンズ	単レンズ singlet lens	色消レンズ doublet lens
50	15	-	1.9E-06	-
100	29	24	6.4E-06	4.7E-06
150	28	24	6.4E-06	4.5E-06
200	35	31	9.6E-06	7.6E-06
300	50	-	2.0E-05	-

E. 実用化のための加工痕形状の整形

蓄積してきたフェムト秒レーザーの再生増幅器出力光(800nm、60fs、1kHz、600mW)による加工成果を体系的にまとめるために、対象材料毎にデータの検証を行なった。加工データを追加補充する必要がある対象材料については実験を行ない、新たにデータを収集した。特に一般的な金属材料(ステンレス等)の加工データは、事業初期における試行錯誤の実験であったために不備な点が若干存在したので、加工閾値近傍における加工を中心に実験を行なった。また、加工データを再取得する過程において、穴あけ加工痕形状の非対称・非円形という新たな問題(図 68-a)が浮上した。実用化に向けて解決すべき問題の一つであると捉え、レンズへのレーザービーム入射位置調整(図 68-b)や光路途中へのアパーチャの挿入などにより(図 68-c)、加工痕形状を円形に整形することができた。



(a)レンズへの入射位置調整無 (b)レンズへの入射位置調整後 (c)アパーチャによるビーム切抜き
 10uJ 1000pulses 1kHz 5uJ 125pulses 1kHz 5uJ 125pulses 1kHz

図 68 ステンレス(SUS304)表面への穴あけ加工痕形状の整形

F. 実用化のための加工スループット向上の検討

フェムト秒レーザー加工を実用化させるために、加工スループットの向上の検討を実施した。これまで、例えば1mm程度の広幅溝を掘る場合、代表的な数十µm程度の集光スポット径による加工では百回程度のビーム走査を要した。ビームを、高速回転するウェッジプリズムを通して円軌跡を描画し、加工対象を直線移動させると、一回の試料走査で、幅の広い溝を作製することができる。

そこで、フェムト秒レーザーとウェッジプリズムを用いてステンレスに円軌跡の加工を行ない、この方法の有用性を確かめた。図69に原理の説明と加工実験結果を示す。実験は500µJ/pulseの



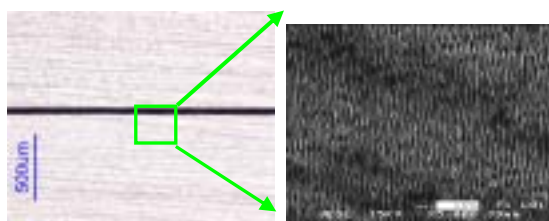
(a) ウェッジプリズム回転による (b) ステンレスへの加工結果 (c) (b)の拡大図
 加工の原理

図 69 ウェッジプリズムを用いたビームによる円軌跡加工

パルスを焦点距離 50 mmの平凸レンズで集光した。レーザー光を高速に回転させて円軌跡加工を行なうことができた。

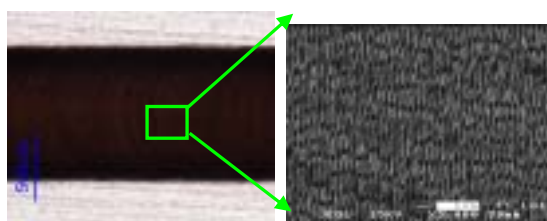
ウェッジプリズムによる円軌跡加工と試料の直線移動と複合的に利用することにより、広い幅の加工を一度の走査で実現でき、スループットが向上すると期待される。実用に近い金属表面への微細周期構造作製加工実験において、その有用性を確かめた。実験では、フェムト秒レーザー再生増幅器出力光を単レンズ($f=50\text{mm}$)で材料表面に集光し、試料を 2.5mm/s で直線移動させる。回転ウェッジプリズムを通過させない場合(図70)とさせた場合(図71)の加工結果の実体顕微鏡写真(a)と電子顕微鏡写真(b)を次に示す。

一回の直線移動で加工できる幅は、試料の移動のみの時(図 70)は約 $40\ \mu\text{m}$ 、円軌跡加工との併用(図 71)では約 1mm であり、ウェッジプリズムを使用すると加工効率が約 25 倍向上する。また、電子顕微鏡による観察像から判断した各々の微細周期構造の様子は、ほぼ同等である。これらのことから、本方法を用いることによって、フェムト秒レーザー加工の実用化を妨げる一因となっていた加工効率を、大幅に向上させることができた。



(a)実体顕微鏡写真(5倍) (b)電子顕微鏡像(5000倍)

図 70 試料の移動のみによるステンレス表面への
微細周期構造作製



(a)実体顕微鏡写真(5倍) (b)電子顕微鏡像(5000倍)

図 71 円軌跡加工と試料の直線移動の併用による
ステンレス表面への微細周期構造作製

(3) 具体的な成果内容：

「レーザー光の産業応用」に関する地域企業の考え方やニーズを、アンケート調査及び面談聞き取り調査によって把握し、本事業及び光 COE 形成の計画・立案に寄与した。

地域企業のニーズや要望を基に蓄積してきた様々な材料に対する加工事例を、フェムト秒レーザー加工事例データベースとしてまとめた。

フェムト秒加工を地場産業である繊維に適用し、焦げ目のない加工や脱色を実現し、繊維加工に有効であることを明らかにした。(プレス記事)

フェムト秒レーザー加工を実用化する際に必要となる加工周辺技術(加工品品質向上のためのレーザービーム形状補正や加工効率向上のための走査技術等)を開発した。

(4) 研究成果に関する評価

国内外における水準との対比

フェムト秒レーザー加工は、多くの報告があるが、ニーズに則した材料を対象にした加工に関する研究は数少ない。加工対象のユニークさ、幅広さと量については、特筆すべきものがある。また、多大な時間を要して実験して構築したフェムト秒レーザー加工事例データベースは、有効に活用できる高い水準に達している。

実用化に向けた波及効果

構築したデータベースは、地元企業などに有効利用でき、その波及効果は大きい。既に、本研究課題の成果を基にして、経済産業省地域コンソーシアム事業で新たな産学官連携が構築され、産業応用へ向けた研究開発が進められている。

(5) 残された課題と対応方針について

フェーズ 1 では、構築したデータベースを地域 COE 拠点において地元企業などに有効利用していく事を計画している。