

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

**平成27年度～令和元年度「私立大学戦略的研究基盤形成支援事業」
研究成果報告書概要**

1 学校法人名 光産業創成大学院大学 2 大学名 光産業創成大学院大学

3 研究組織名 光産業創成大学院大学

4 プロジェクト所在地 静岡県浜松市西区呉松町 1955-1

5 研究プロジェクト名 フェムト秒レーザーによるナノ極限加工の産業化研究

6 研究観点 研究拠点を形成する研究

7 研究代表者

研究代表者名	所属部局名	職名
瀧口 義浩		学長

8 プロジェクト参加研究者数 6 名

9 該当審査区分 理工・情報 生物・医歯 人文・社会

10 研究プロジェクトに参加する主な研究者

研究者名	所属・職名	プロジェクトでの研究課題	プロジェクトでの役割
瀧口義浩	学長	レーザー加工技術の開発と 応用化	研究統括、地域における レーザー応用産業の 発展
坪井昭彦	副学長、光 加工・プロ セス分野・ 教授	レーザー加工技術の開発と 応用化	地域におけるレーザー 応用産業の発展
沖原伸一郎	光加工・プ ロセス分 野・准教授	レーザー加工技術の開発と 応用化	地域におけるレーザー 応用産業の発展
楠本利行	光加工・プ ロセス分 野・助教	レーザー加工技術の開発と 応用化	地域におけるレーザー 応用産業の発展
真鍋武士	光加工・プ ロセス分 野・研究補 助員	レーザー加工技術の開発と 応用化	地域におけるレーザー 応用産業の発展
花山良平	光情報・シ ステム分 野・准教授	レーザーと機械加工技術の マッチング	地域におけるレーザー 応用産業の発展
横田浩章	光バイオ分 野・准教授	レーザーと生体加工技術の マッチング	地域におけるレーザー 応用産業の発展

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

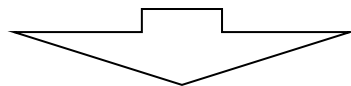
(共同研究機関等)			
豊田晴義	浜松ホトニクス株式会社中央研究所	LCOS を用いた多点同時加工のマネージング	高スループット加工の実現
伊藤晴康	浜松ホトニクス株式会社中央研究所	LCOS を用いた多点同時加工のマネージング	高スループット加工の実現
植田浩安	浜松工業技術支援センター	フェムト秒レーザーの企業応用研究	地域におけるレーザー応用産業の発展
寺岡裕師	株式会社コヒレント	フェムト秒レーザー光源の産業応用	地域におけるレーザー応用産業の発展
社本英奏	株式会社レーザックス	フェムト秒レーザーの産業応用(機械加工)	地域におけるレーザー応用産業の発展
刀原貴寛	株式会社ナノプロセス	フェムト秒レーザーの産業応用(機械加工)	地域におけるレーザー応用産業の発展
下北 良	ジーニアルライト株式会社	フェムト秒レーザーの産業応用(生体加工)	地域におけるレーザー応用産業の発展

<研究者の変更状況(研究代表者を含む)>

旧

プロジェクト外での研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
レーザー加工技術の開発と応用化	光加工・プロセス分野・教授	坪井昭彦	地域におけるレーザー応用産業の発展

(変更の時期:平成 28 年 4 月 1 日)



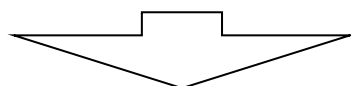
新

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
光加工・プロセス分野・教授	副学長、光加工・プロセス分野・教授	坪井昭彦	地域におけるレーザー応用産業の発展

旧

プロジェクト外での研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
レーザー加工技術の開発と応用化	光加工・プロセス分野・講師	沖原伸一郎	地域におけるレーザー応用産業の発展

(変更の時期:平成 29 年 4 月 1 日)



新

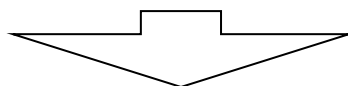
法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
光加工・プロセス分野講師	光加工・プロセス分野准教授	沖原伸一郎	地域におけるレーザー応用産業の発展

旧

プロジェクトでの研究課題	所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
レーザー加工技術の開発と応用化	光情報・システム分野・教授	瀧口義浩	研究統括、地域におけるレーザー応用産業の発展
レーザー加工技術の開発と応用化	光情報・システム分野・講師	花山良平	地域におけるレーザー応用産業の発展

(変更の時期:平成 30 年 4 月 1 日)



新

変更前の所属・職名	変更(就任)後の所属・職名	研究者氏名	プロジェクトでの役割
光情報・システム分野・教授	学長	瀧口義浩	研究統括、地域におけるレーザー応用産業の発展
光情報・システム分野・講師	光情報・システム分野・准教授	花山良平	地域におけるレーザー応用産業の発展

上記 3 件はいずれも昇格などに伴う職名の変更であり、研究者の本構想計画における役割など、実施に係る影響はない。

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

11 研究の概要

(1) 研究プロジェクトの目的・意義及び計画の概要

本研究プロジェクトの目的は、フェムト秒超短パルスレーザー(femtosecond ultrashort pulse laser、以下、fsUSPL と略す)を用いた微細加工技術の産業化促進を実施する基盤形成である。fsUSPL 加工は、刃物など工具を用いた加工技術と比較して①加工領域として他の加工方法では実現が困難である μm オーダー以下の加工が可能、②刃物などの消耗品が少ないため、ランニングコストの面で優位性を持つ。また、連続発振レーザーなどによる加工と比較して、加工周辺へのバリや熱が伝わることによる変異部が少なく品質の高い後処理が不必要な加工が可能など、他の加工より優位性の高い加工が可能となる。

しかしながら、fsUSPL 加工は、他の加工方法に対して①加工除去量が少なく生産性が低い、②fsUSPL 用光源が高価、初期投資の費用が掛かるなどの課題がある。産業界が fsUSPL 加工技術を生産現場に導入する場合、①を考慮した研究・開発が不可欠であるが、②のために自社にて研究設備を揃えることは、リスクが高くなる。

そこで、本研究プロジェクトでは、以下の 2 点を目的とした。[1] 産業化技術開発も可能となる fsUSPL 加工機の開発、[2] 開発した加工機利用を中心とした産業育成のための企業との連携強化等による地域活性化。それぞれの目的に対する具体的な計画は、以下の通りである。[目的 1] ガルバノスキャナによる高速光走査、空間光位相変調器(Liquid Crystal on Si Spatial Light Modulator、以下、LCOS-SLM と略す)を用いての空間的多点同時加工などの産業化技術開発向け fsUSPL 加工機の開発と、開発した加工機による各種材料加工と、機械学習(AI)によるレーザー加工条件および材料物性からレーザー加工結果を予測する学習モデルの構築方法の開発、[目的 2] 外部企業との共同研究および本学主催の企業向けレーザー加工技術教育講座である「レーザーによるものづくり中核人材育成講座」での活用などを含めた、産業への技術導入の促進。その他の技術開発として、フェムト秒レーザーを用いた Additive Manufacturing による 3 次元造形の検討も行った。

(2) 研究組織

光産業創成大学院大学 光加工・プロセス分野を中心としたプロジェクトチームを形成。光加工・プロセス分野が fsUSPL 加工機のレーザー本体を含む選定・設置・制作・運用を行った。光情報・システム分野は、fsUSPL 加工機のシステム開発を行った、光バイオ分野は、制作した fsUSPL 加工機を用いた応用技術開発を行った。

(3) 研究施設・設備等

以下に、本研究によって本学に導入された研究施設・設備等およびその仕様を示す。

[フェムト秒レーザー加工機]

○光源：COHERENT 製[型番：フェムト秒超短パルスレーザー再生増幅器 Astrella]

中心波長：800nm、パルス幅：100fs、パルスエネルギー：7mJ/パルス、繰り返し周波数 1kHz、ビーム径：11mm



図 1 レーザー光源

○加工用光走査軸およびメカ走査軸

①歯科用ミリングマシン DWX-51D 特注仕様(図 2 左): DGSHAPE 製
メカ軸：直線 3 軸(XYZ、最大走査速度 30mm/s、加工範囲 XY: $\pm 50\text{mm}$ 、Z: 0~40mm)および回転 2 軸(AB、A 軸: $-180\sim 180^\circ$ 、B 軸: $-30\sim 30^\circ$)。この装置に、外部から導光して対物レンズにて試料に照射できるようにした特注仕様。



図 2 加工機①の外観(左側)およびレーザー照射部(右側)の写真。右側写真中央に対物レンズがある。

②歯科用ミリングマシン DWX-51D 特注仕様: DGSHAPE 製
メカ軸：①と同様。ただし①の対物レンズの代わりに、ガルバノスキャナにて、さらに 2000mm/s の高速走査できる XY 軸を追加した特注仕様(図 2 右)。

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

③高空間分解能加工用倒立顕微鏡型試料走査機(図 3):シグマ光機製[型番:倒立型顕微鏡用自動 XY ステージ BIOS-Light BIOS-LT-S(XY 軸)およびコンパクトスケール内蔵 1 軸自動ステージ(Z 軸)]
メカ軸:直線 2 軸(XY、空間分解能 0.1 μ m、繰返し位置決め精度 1 μ m、加工範囲 X 軸 110mm、Y 軸 75mm)および直線 1 軸(Z 軸、空間分解能:ハーフパルスで 1 μ m、繰返し位置決め精度 2 μ m、走査範囲 35mm)。

④LCOS-SLM:浜松ホトニクス製 [型番:空間光位相変調器 X10468-02]

使用可能波長帯域:800nm \pm 50nm、光利用効率:97%(785nm)、画素数:800 \times 600、有効エリアサイズ:15.9mm \times 12mm、画素ピッチ:20 μ m。上述の加工機との同時使用を容易にするため、装置への入射光と出射光が同軸となるように光学素子が配置されたモジュール仕様。

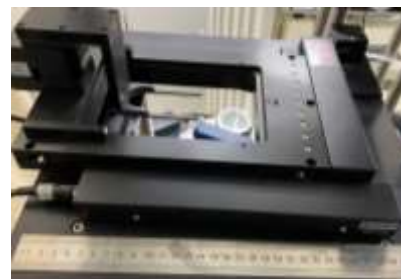


図 3 倒立顕微鏡型試料走査機の外観写真。中央付近の対物レンズにより下から試料へレーザー照射・加工ができる。

(4) 研究成果の概要

以下に、各目的に対する研究成果の詳細を示す。

[目的 1] 産業化技術開発も可能となる fsUSPL 加工機の開発

[1-1] 高パルスエネルギー fsUSPL の導入(平成 27 年度)

LCOS-SLM を用いての多点同時加工を可能にした fsUSPL 加工機を導入する場合、分散させた各集光点でのレーザー光強度が材料加工閾値を超える必要がある。よって、平均出力と同時に高パルスエネルギーが必要となる。そこで、「(3) 研究施設・設備等」に記載された fsUSPL 光源を導入した。この fsUSPL 光源のパルスエネルギーが 7mJ 以上とは、レーザー波長である 800nm で透過領域となるために難加工材となるガラス、石英、サファイアなどを多光子吸収過程によって内部加工する際のレーザー加工閾値が 50 \sim 200 μ J 程度であることを考慮すると、十分超高強度といえる。また、レーザーの繰返し周波数は 1kHz と比較的高いことも、加工性能を高めるには有効である。

[1-2] 超高強度パルスエネルギー fsUSPL 用アッテネーターの開発(平成 28-30 年度)

レーザー加工の生産効率および品質の制御を行うためには、レーザー光強度を制御するアッテネーターが必要不可欠である。上述のレーザー光源の仕様から、アッテネーターの仕様は以下の 3 つである:①ビーム径 ϕ 11mm から開口径 ϕ 22mm 以上、②パルスエネルギー 7mJ、ビーム径 ϕ 11mm からレーザー強度密度(フルエンス)7.37mJ/cm² 以上の光耐力、③ fsUSPL 加工機内の光学系への導入の簡便さから、入射光と出力光が平行となる。しかしながら、これらの仕様を全て満たすアッテネーターは市販品では存在しなかった。そこで、 $\lambda/2$ 波長板 1 枚と偏光板 2 枚を組み合わせ新たなアッテネーターを自作し、手動タイプと PC 制御タイプの 2 式開発した。1 つ目の手動タイプでレーザー光源の経年劣化等によるレーザー光強度のばらつきを抑え、2 つ目の PC

制御タイプで詳細なレーザー光強度を制御できる直列駆動システムを開発した^{*1, *7}。開発した装置の外観写真を図 4 に示す。このシステムを用いて、1 つ目のアッテネーターにて最大パルスエネルギー 4.7mJ にした入射光に対する 2 つ目のアッテネーターの $\lambda/2$ 波長板を回転させたときの設定角度と出力光強度の依存性を示したグラフを図 5 に示す。図 5 から、このアッテネーター 1 つで、入射



図 4 手動(1st)および PC 制御(2nd)アッテネーターの外観

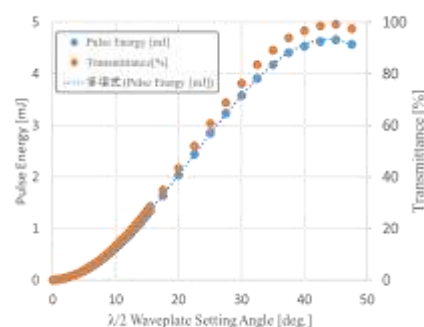


図 5 PC 制御(2nd)アッテネーターの設定角度による出射光強度依存性

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

光の 0.2～100%まで任意の出射光強度に制御可能であることが分かった。よって、今回開発したアッテネーター・システムは、パルスエネルギー30nJ ～ 7mJ の非常に広いダイナミックレンジでレーザー光強度を制御でき、産業用途には十分転用できることがわかった。

[1-3]開発したレーザー加工機による加工結果と品質工学・機械学習を用いたデータ解析

[1-2]で開発したアッテネーターから出射されたレーザー光を ”(3)研究施設・設備等 加工用光走査軸およびメカ走査軸”にて記載されている光およびワーク走査システムに導入し、それによって集光したレーザー光をワーク照射することでレーザー加工できるシステムを構築した。以下に実際の加工結果を示す。

○対物レンズを用いた加工機による加工結果

加工結果の一例として、切削加工用工具材料として重要な材料の一つである焼結ダイヤモンド(PCD)のフェムト秒レーザーによる直線溝加工の断面顕微鏡写真を図 6 に示す。図の赤斜線部分が除去部分である。アスペクト比 1.5 以上だとレーザー加工条件を最適化することで、加工幅として 50 μ m の加工幅が実現できている。他の材料であれば、例えば鉄系材料の SPCC であればシングルショットで直径 10 μ m 以下の穴加工も実現できている。また、これらの加工結果からレーザー加工条件の最適化を実施するための統計処理方法として、品質工学^{*3, *8} および機械学習^{*4-7, *9-11}を用いた研究開発を実施した。

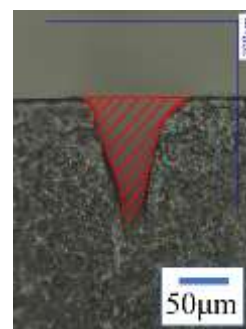


図 6 PCD のレーザー加工断面写真

品質工学とは、開発設計の技術者のための汎用性が高く、最終的な市場品質を考慮しながら設計開発の段階から製造方法を開発する手法である。今回の研究では、品質工学における L18 といわれる条件選出法を用い、2 水準(2つの条件の意味)持つ加工条件 1つと 3 水準持つ加工条件 7つ(全部で $2^1 \times 3^7 = 4374$ 通り)の中の加工条件の中から、加工結果が安定しており、かつ加工効率が最も良い最適条件を 108 通りの加工結果から推測する手法を用いた。今回は、PCD の材料特性違い(メーカーおよびダイヤモンド粒子の粒子径違い)に対する最適条件を模索した。最終的な加工結果が図 7 である。横軸に走査回数、縦軸にレーザー加工除去量を示している。材料 A および B(図 7 の□および▲)で加工結果の差が小さいほど最適条件となる。図 7 から、今回導出した最適条件では、走査回数で加工量を線形で制御でき、かつ材料違いによるばらつきを最小限まで抑える加工条件となっていることが分かった。最初に想定していた加工条件と比較すると、ばらつきは 1.8 分の 1、レーザー照射エネルギーに対する加工効率は 1.25 倍となった。

機械学習を用いた研究開発に関しては以下のように実施した。レーザー加工への機械学習応用方法の概念図を図 8 に示す。本プロジェクトにおけるレーザー加工への機械学習の応用とは、レーザー加工条件やインプロセスモニタリングなどを入力データとし、加工除去量や加工品質などを出力データとして計算するための変換方法(関数)を機械学習の学習モデルで作成することである。今回は、レーザー加工時の照射パルスエネルギー、焦点距離、光走査速度などのレーザー加工条件、およびワークの光吸収率や熱伝導などの材料特性を入力データとして、フェムト秒レーザー加工による直線溝加工時の除去量(図 6 の赤斜線部分の面積)を出力データとして予測するような学習モデルの構築を実施した。最初に、PCD の加工結果(約 400 の実験条件)に対して、従来の重回帰分析(線形回帰による学習モデル構築)と機械学習による学習モデル構築を比較した。とある加工条件における、学習モデルでの計算による加工量を横軸に、実際の加工量を縦軸に示したグラフを図 9 に示す。このグラフにおいて、青点は学習モデルに使用したデータを、赤点は、そ

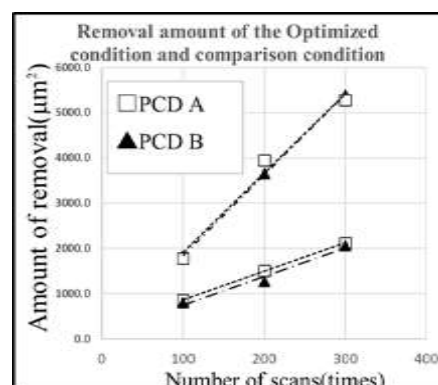


図 7 品質工学による PCD のレーザー加工条件最適化の結果

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

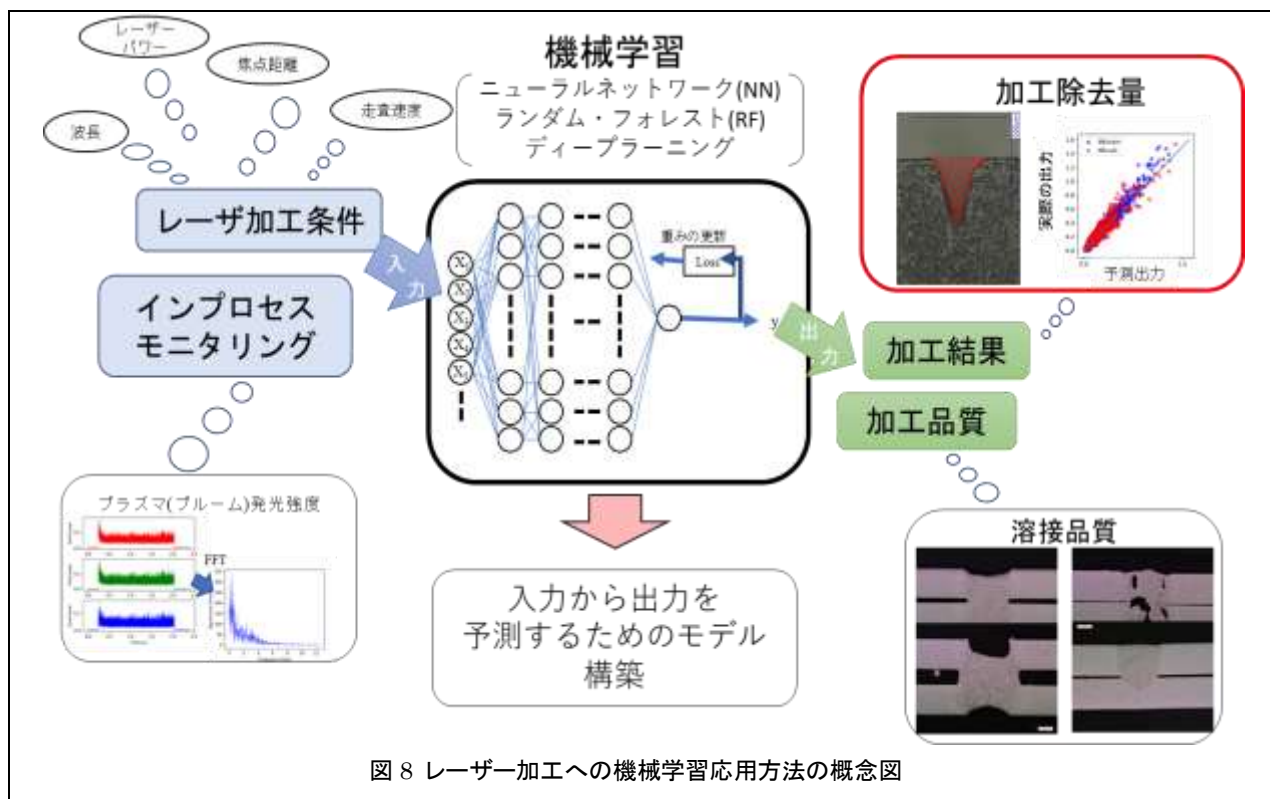


図 8 レーザー加工への機械学習応用方法の概念図

の学習データが妥当かどうかを検証した際のデータを示している。Y=X の関数(青実線)は、学習モデルで計算した値と実験結果が同じ値であることを意味している。すなわち、青実線近傍にデータが集まっているとき、作成した学習モデルが実際の実験値を計算できており、より予測精度の高い学習モデルを構築できることを意味する。図 9 から、従来の重回帰分析で作成した学習モデルよりも、機械学習で作成した学習モデルの方がより精度の高い予測ができることが明らかとなった。これは、レーザー加工に影響を与えるパラメータとしてレーザーのパルスエネルギーや集光レンズの焦点距離、走査速度などがあるが、これらのパラメータは加工結果に対して単純な線形応答を示さず複雑な相関となることが多いためである。すなわち、レーザー加工の加工条件から加工結果を予測する計算モデルを機械学習による学習モ

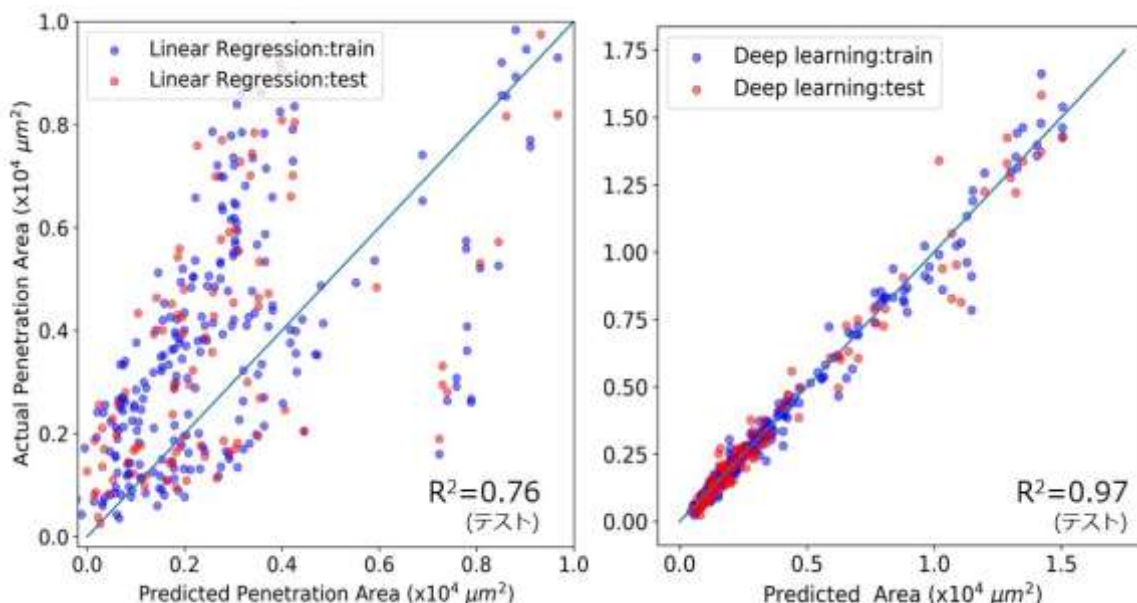


図 9 重回帰分析(左)と機械学習(右)によるモデル構築の結果

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

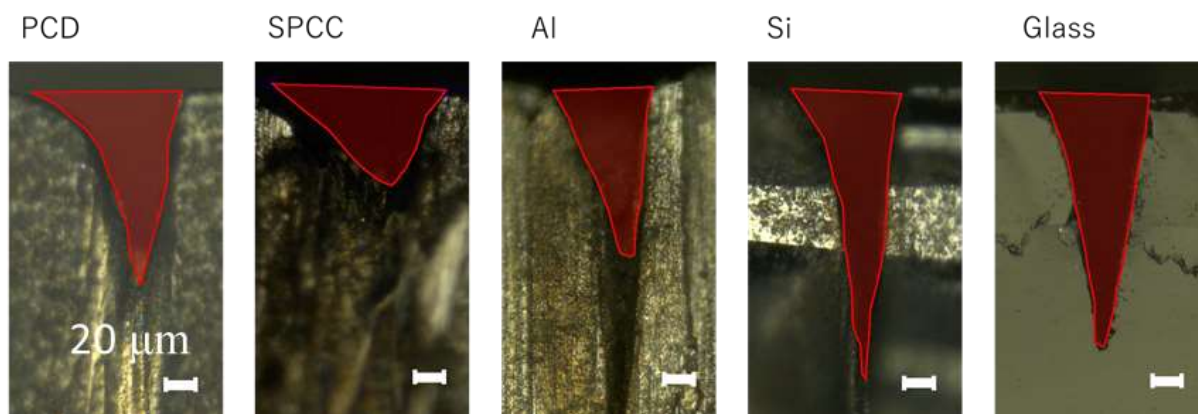


図 10 PCD、SPCC、Al、Si およびガラスのレーザー加工後の断面写真

デルで構築することは、非常に有効であることが分かった。次に、複数のワークの同様の加工(図 10 参照)を実施し、材料のレーザー波長での吸収係数や屈折率、熱伝導度などの熱特性などの材料特性も入力データに入れることで、レーザー加工条件と材料特性からレーザー加工結果を予測すること(マテリアルズ・インフォマティクス)を試みた。ワークとしては複合材料として PCD、金属として鉄系材料(SPCC)および Al(A1050)、半導体として Si、絶縁体としてガラス(ソーダ石灰ガラス)、の 5 種類を用いた。材料特性を表 1 に示す。レーザー波長(800nm)での光吸収特性を含む光物性や熱伝導特性などの熱物性がすべてのワークにおいて大きく異なっていることがわかる。なお、複合材料である PCD の材料物性は、90%ダイヤモンド、10%コバルトから材料特性を決めている。本研究プロジェクトで実施した機械学習によるモデル構築方法の概念図を図 11 に示す。図 11 のように、①ワーク毎にそれぞれ学習モデルを構築する、②全ワークのデータで一つの学習モデルを構築する、③4つのワークを使って学習モデルを構築し、その学習モデルで残った1つのワークの加工結果を予測する(マテリアルズ・インフォマティクス)、の 3 つの構築方法を検討した。レーザー加工条件を表 2 に示す。これらの条件

表 1 ワーク毎の材料物性

Parameters	Materials				
	PCD	SPCC	Al	Si	Glass
Heat Conductivity [W/(m·K)]	450	63	225	149	1
Linear expansion coefficient $\times 10^{-6}$ [1/K]	5	12	23.5	2.6	8.5
Refractive index at 800nm	2.2295	3.6794	2.3737	3.6690	1.508
Extinction Coefficient (κ) at 800nm	0.75931	10.413	7.5226	6.5435E-3	2.0400E-7
Density [g/cm ³]	4	7.85	2.71	2.33	2.50
Specific heat capacity [J/(g·K)]	0.501	0.46	0.88	0.705	0.837
Thermal diffusivity [m ² /s]	2.25E-4	1.75E-5	9.44E-5	9.08E-5	4.78E-7
Melting Temperature [K]	1768	1803	923	1687	1300
Melting specific latent heat [kJ/mol]	16.06	259	10.3	50.21	8.5
Boiling Temperature [K]	3844	2863	2793	2628	2503
Boiling specific latent heat [kJ/mol]	680.3	416.3	326.4	359	600

表 2 レーザー加工条件

Parameters [unit]	Conditions
Wavelength [nm]	800 (fixed)
Repetition Rate [Hz]	1000 (fixed)
Pulse energy [μJ]	30 - 300
Pulse width [fs]	100 (fixed)
Chirp [fs]	0, +10
Beam diameter [mm]	9.2 (fixed)
Focal length [mm]	50, 75, 100
Defocusing value [mm]	0 (fixed)
Polarization against scan direction	Vertical, Horizontal, Circularly
Scan speed [mm/s]	10, 20, 30
Assist gas (air) [Mpa]	0, 0.04

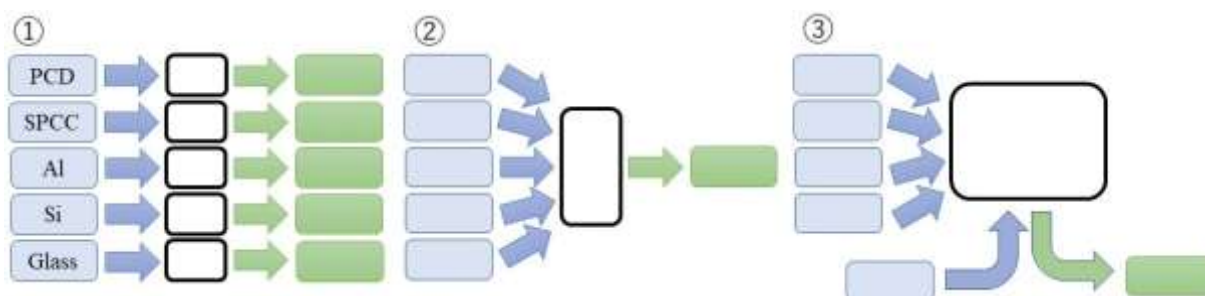


図 11 本研究プロジェクト実施した機械学習の模式図

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

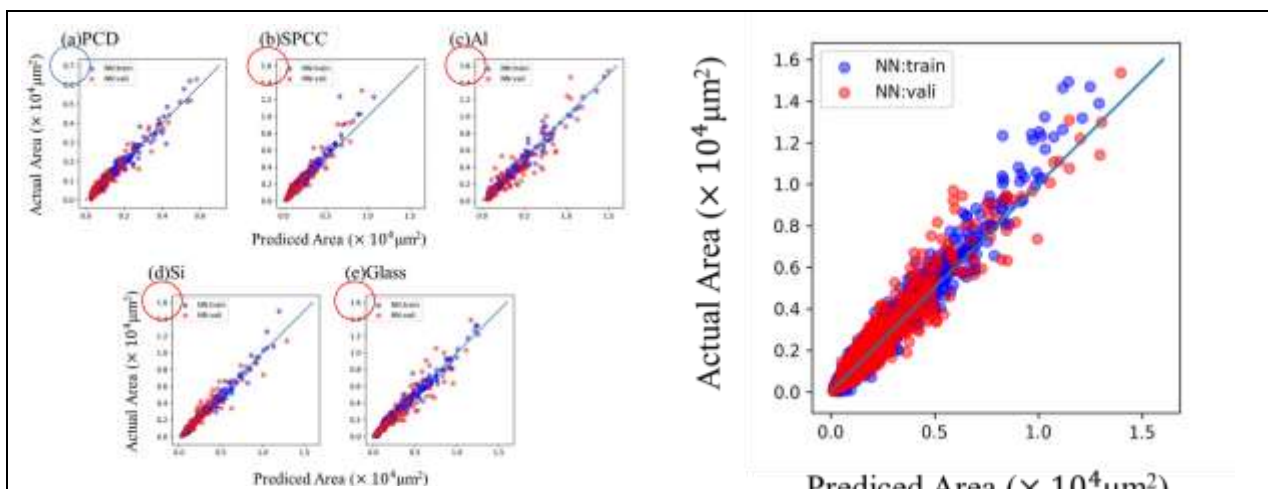


図 12 パターン①での機械学習の結果。PCD のみ、最大加工量が小さいことに注意

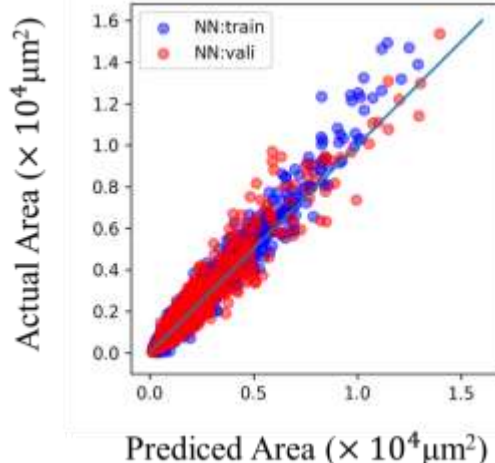


図 13 パターン②での機械学習の結果

からランダムに組み合わせ、ワーク毎に約 340 条件で加工実験を実施し、その加工データを出力量とした。まず、①の結果を図 12 に示す。図 12 から、ワーク毎に精度がことなるものの、すべてのワークでモデル構築が可能であることが分かった。ワーク毎の精度は、Al で ±40%、それ以外のワークでは ±20% 程度であった。次に、②の結果を図 13 に示す。図 13 から、材料特性を入れることで、本研究プロジェクト

で使用したすべてのワークに対して ±40% 程度の精度でレーザー加工除去量を予測できる学習モデルを構築できた。最後に、③の結果を以下に示す。SPCC、Al、Si およびガラスを未知のワークとして予測した場合の結果を図 14 に示す。図 14 から、単体材料に関しては、機械学習の学習モデルで ±40% 程度の精度で予測できた。一方、PCD の結果を図 15 に示す。モデル構築(青点)は単体材料の時とほぼ同様にできているが、PCD のデータ(赤点)の傾きは明らかに理想関数(青実線)とは異なっている。これは、PCD の加工結果予測ができていないことを意味する。この理由として、PCD の材料特性の一部にダイヤモンド 90%、コバルト 10% から予測した値を入れているため、真の材料特性の値が入っていないことであると思慮される。これを解決するためには、異なる材料物性を持つワークの加工データの蓄積と、その入力方法に関するノウハウをためていく必要がある。

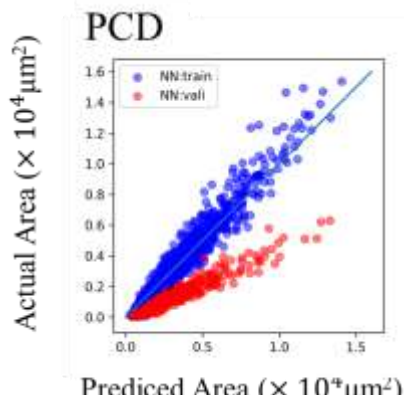


図 15 パターン③での機械学習の結果：PCD の場合

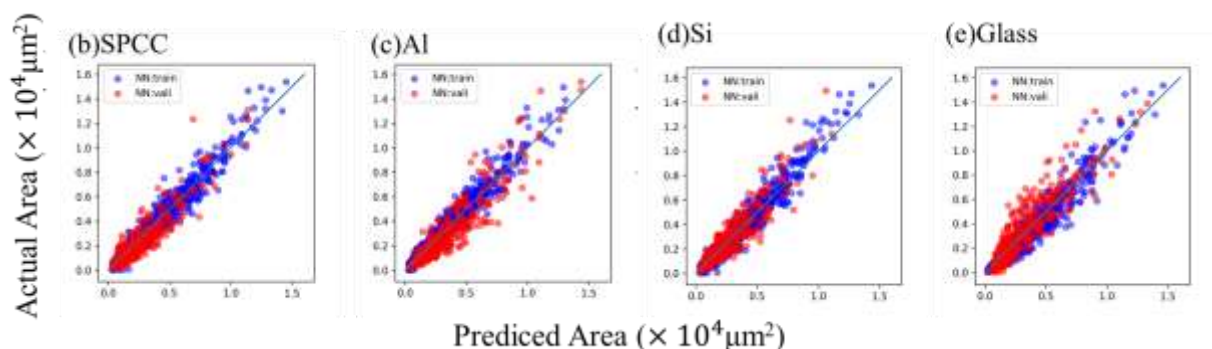


図 14 パターン③での機械学習の結果：SPCC、Al、Si およびガラスの場合

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

○ガルバノスキャナを用いた加工結果

ガルバノスキャナを用いることで、メカ軸の最大走査速度(30mm/s)よりも大きく走査速度を上げてレーザー加工を実施することができる。繰り返し周波数 1kHz であることを考慮して、50mm/s(すなわち、50 μ m/pulse)、焦点距離 f250mm の平凸レンズ集光して SPCC を 3000 パスで円加工した際の結果の外観写真を図 16 に示す。幅約 120 μ m の幅での均等なレーザー加工痕が確認できた。走査速度として、1000mm/s までの加工速度が実現できており、これを用いての高速走査加工実験の準備も整った。

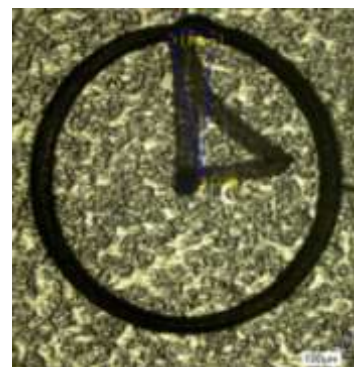


図 16 ガルバノスキャナでの加工結果

[目的 2] 産業育成のための企業との連携強化等による地域活性化

[2-1] ローランドディー・ジー株式会社と共同研究を開始^{*12}。平成 29 年度より DGSHAPE 株式会社(ローランドディー・ジー株式会社の 100%子会社)と継続中(平成 28 年度から)

平成 28 年度より、ローランドディー・ジー株式会社と共同研究を開始し、その旨をプレスリリースし、更に HP 等にて公開した。平成 29 年度より、ローランドディー・ジー株式会社の 100%子会社である DGSHAPE 株式会社と同内容にて継続的に共同研究を実施している。

[2-2] 本学主催の企業所属者向け人材育成プログラム「レーザーによるものづくり中核人材育成講座」における活用を開始^{*13} (平成 28 年度より)

本学は平成 23 年度より、レーザー加工技術を産業界にて活用できるよう、企業所属者向けにレーザー加工技術を活用できる人材の育成プログラム「レーザーによるものづくり中核人材育成講座」を毎年開講している。平成 28 年度より、この講座内にて開催している実習講義の一つ「レーザー実習 1:短パルスレーザー加工」において本研究プロジェクトにて開発した fsUSPL 加工機による実習を行っている。また、平成 29・30 年度において、この講座内にて「ケーススタディ1 品質工学を応用したパラメータの最適化実習」において、本研究プロジェクトにて開発した fsUSPL 加工機を用いた実験結果を利用している。

[2-3] 他の企業との連携

秘密保持の関係で詳細は控えるが、今回開発した fsUSPL 加工機を用いたガラス・セラミック・金属およびその複合体など、様々な材料のデモ加工を実施している。また、その中から上述以外の共同研究も実際にスタートしている。

<優れた成果が上がった点>

・生産へのレーザー加工機導入時に必要となる、レーザー加工条件の最適化の探索時に活用できる、品質工学および機械学習の手法を導入した。これにより、本研究プロジェクトで開発したシステムにおける実験条件の最適化手法を開発。特に単体の材料に関しては、現在の機械学習用アルゴリズムを用いて加工結果予測用プログラムを作成できる。一方、複合材料に関しては、単純な材料特性の入力ではうまく作成できないことが判明したため、今後も研究開発を通じてノウハウを取得する予定である。

<課題となった点>

・本研究プロジェクトの目的である fsUSPL 加工の産業化を研究開発する際、レーザー光出力の 8 時間以上の長時間の安定性能は必須の仕様となる。本研究プロジェクトで導入したレーザー光源からのレーザー光出力は、初期に 1 時間程度で数%程度減衰するなど、不安定な状態であった。そこで、レーザー光源メーカーと密に連絡を取り合い、1 年に 3 回程度のメンテナンス作業を含めた光源内部および周辺機器の最適化を実施することで、8 時間で数%程度の

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

減衰まで改善させた。

・本研究プロジェクトにて使用するレーザー光のパルスエネルギーが高強度すぎるため、耐力保証をしている既存メーカー製PC制御可能アッテネーターがなかった。そのため、PC制御可能なアッテネーターの設計・製作を実施した。なお、今回製作したアッテネーターは、製作してからPC制御アッテネーターで約3年間、手動アッテネーターで約1.5年間、多少の光学調整や光学部材の確認などのメンテナンスを実施しているが、光学素子交換などの不具合は生じていない。

<自己評価の実施結果と対応状況>

上述の[目的1]に関しては、fsUSPL光源を用いたレーザー加工機が実際に動き始めており、また、[目的2]に関しては、早い時期から地域企業との共同研究を通じて産業側のニーズを収集しつつ産業応用技術開発ができたと考えられる。

<外部(第三者)評価の実施結果と対応状況>

株式会社アルプスエンジニアリング 営業部レーザー担当部長 山田爲英様、およびDGSHAPE株式会社 製品開発部 前田敏男様に対し、本研究プロジェクトの実施結果について説明し、以下のような評価をいただいた。

○本研究プロジェクトの目的は、レーザー加工技術が浸透しつつある産業界において、さらなる加工品質向上を目指している現状とよくマッチングしている

○特に、産業界にとってはタクトタイム軽減などのコストダウンに関する技術開発は、新規技術導入において非常に重要である。その点において、本研究プロジェクトの目的は産業界のニーズとよく一致している。

○今後、LCOS-SLM やガルバノスキャナを用いた上記技術開発ができる拠点として活用されることを期待する。

これらのご意見から、本研究プロジェクトの目的及び開発の方向性と産業界のニーズの方向性が一致していることが確認できた。

<研究期間終了後の展望>

品質工学および機械学習による加工条件最適化手法は、特に産業化技術の開発にとって効率よく研究開発できるとして、非常に注目されており、かつ必要不可欠な開発手法である。この技術はものづくり企業および産業へ結び付けたい研究開発機関の方から評価されており、NDAの関係で詳細は触れることはできないが、個別に2021年度の予算申請および共同研究等へ発展している。今後、産業界の方々と共同研究等を介して密に情報交換していく。このように、学術的なシーズを開発するのみならず、産業界のニーズとマッチングさせた研究開発にも、本研究プロジェクトで開発したシステムを活用していく。

<研究成果の副次的効果>

基礎研究として、楠本が令和元年度より本研究プロジェクトのfsUSPL加工システムを用いた科学研究助成事業(19K04114)を獲得している。内容は、本研究プロジェクトのシステムを用いたPCD成形技術の切削用工具製造技術への適応に関する研究開発であり、産業化に向けた基礎研究である。

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

12 キーワード(当該研究内容をよく表していると思われるものを8項目以内で記載してください。)

- (1) 100fs 超短パルス (2) レーザー加工機 (3) 超高強度パルスエネルギー
 (4) 空間パターン制御 (5) 高速光走査 (6) 産業化応用技術開発
 (7) 機械学習 (8) シーズ・ニーズのマッチングによる企業連携

13 研究発表の状況(研究論文等公表状況。印刷中も含む。)

上記、11(4)に記載した研究成果に対応するものには*を付すこと。

<雑誌論文>

- ・[*1]楠本利行, “超高強度フェムト秒レーザーによるレーザー加工システム開発”, 静岡県工業技術研究所浜松工業技術支援センター第10回研究・開発成果発表会要旨集, 2017, No.02
- ・[*2]坪井昭彦, 沖原伸一郎, 楠本利行, “光産業創成大学院大学 光加工・プロセス分野の紹介 -教育システムとその特徴, および活動状況-”, レーザ加工学会誌, 24(3), 2017, pp.8-12
- ・[*3]舟山博人, 楠本利行, 内山文宏, 森清和, 坪井昭彦, 田口伸, 森芳孝, “品質工学(タグチメソッド)を用いたフェムト秒レーザーによる加工条件最適化”, レーザ加工学会第89回講演会要旨集, 2018, p.205.
- ・[*4]楠本利行, 森清和, “機械学習によるレーザ加工の知能化 ~第1報 フェムト秒レーザーによる焼結ダイヤモンド加工の予測~”, 第90回レーザ加工学会講演論文集(2018.12), 2018.
- ・[*5]楠本利行, “フェムト秒超短パルスレーザー加工への機械学習の適応事例”, 日本原子力研究開発機構レーザー応用技術 産学官連携成果報告会(令和元年度) 予稿集, 2019, p.14.
- ・[*6]楠本利行, 森清和, “機械学習によるフェムト秒レーザー除去加工性能の予測”, 第92回レーザ加工学会講演論文集(2019.12), 2019, pp.11-15.

<図書>

なし

<学会発表>

- ・[*7]楠本利行, “超高強度フェムト秒レーザーによるレーザー加工システム開発”, 静岡県工業技術研究所浜松工業技術支援センター第10回研究・開発成果発表会, 平成29年6月9日
- ・[*8]舟山博人, 楠本利行, 内山文宏, 森清和, 坪井昭彦, 田口伸, 森芳孝, “品質工学(タグチメソッド)を用いたフェムト秒レーザーによる加工条件最適化”, レーザ加工学会第89回講演会ポスター講演1, 平成30年5月23日
- ・[*9]楠本利行, 森清和, “機械学習によるレーザ加工の知能化 ~第1報 フェムト秒レーザーによる焼結ダイヤモンド加工の予測~”, 第90回レーザ加工学会講演会ポスター講演2, 平成30年12月10日.
- ・[*10]楠本利行, “フェムト秒超短パルスレーザー加工への機械学習の適応事例”, 日本原子力研究開発機構レーザー応用技術 産学官連携成果報告会(令和元年度), 令和元年12月6日.
- ・[*11]楠本利行, 森清和, “機械学習によるフェムト秒レーザー除去加工性能の予測”, 第92回レーザ加工学会講演会, 令和元年12月9日.

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

<研究成果の公開状況>(上記以外)

シンポジウム・学会等の実施状況、インターネットでの公開状況等

<既に実施しているもの>

「レーザーによる中核人材育成講座」HPにて、本研究プロジェクト成果の一部である fsUSPL 加工機を使用している(超短パルスレーザーによる実習)旨、公開している

参考 URL: <http://www.gpi.ac.jp/chukaku/pillar.html#anchor02>

<これから実施する予定のもの>

なし

14 その他の研究成果等

・[*12] 平成 28 年度より、ローランドディー.ジー.株式会社と共同研究を開始し、その旨をプレスリリースして HP 等にて公開した。

研究内容は、セラミックへのレーザー加工技術開発。現在、ローランドディー.ジー.株式会社の 100%子会社である DGSHAPE 株式会社と継続的に共同研究を行っている。

参考 URL: ローランドディー.ジー.株式会社企業ニュース(平成 28 年 6 月 17 日)

<https://www.rolanddg.com/ja/news/2016/160617-roland-dg-joint-research-on-laser-fabrication-technology-with-gpi>

・[*13] レーザーによるものづくり中核人材育成講座

本学主催の企業所属者向け人材育成プログラム。平成 23 年度より、レーザー加工技術を産業界にて活用できるよう、企業所属者向けにレーザー加工技術を活用できる人材育成プログラム「レーザーによるものづくり中核人材育成講座」を毎年開講している。平成 28 年度より、この講座内にて開催している実習講義の一つ「レーザー実習 1: 短パルスレーザー加工」において、本研究プロジェクトで作成した fsUSPL 加工機による実習を行っている。また、平成 29 年度より、この講座内にて「ケーススタディ1 品質工学を応用したパラメータの最適化実習」として、レーザー加工条件出しへの品質工学(タグチメソッド)の適応方法をケーススタディとして講義している。この際に使用するレーザー加工実験結果として、本研究プロジェクトにて作成した fsUSPL 加工機実験結果を利用している。このケーススタディは、講座の特色ある講義の一つとして、パンフレットにて紹介されている。

参考 URL: レーザーによる中核人材育成講座 紹介 HP および 2019 年度パンフレット

<https://www.gpi.ac.jp/chukaku/>

<https://www.gpi.ac.jp/chukaku/pamphlet2019.pdf>

なお、この講座は、文部科学省の大学等における社会人や企業等のニーズに応じた実践的・専門的なプログラム「職業実践力育成プログラム」(BP)として認定されており、この講座のうちの「プラス実習コース」は、厚生労働大臣より中長期的なキャリア形成を支援する講座として指定を受けている。また、同プログラムは第 10 回(2018 年度)レーザー学会産業賞貢献賞を受賞した。

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

15 「選定時」及び「中間評価時」に付された留意事項及び対応

<「選定時」に付された留意事項>

特になし

<「選定時」に付された留意事項への対応>

特になし

<「中間評価時」に付された留意事項>

特になし

<「中間評価時」に付された留意事項への対応>

特になし

法人番号	221009
プロジェクト番号	S1511020L

16 施設・装置・設備・研究費の支出状況(実績概要)

(千円)

年度・区分	支出額	内 訳						備 考
		法 人 負 担	私 学 助 成	共同研 究機関 負担	受託 研究等	寄付金	その他()	
平成 27 年度	施 設	0						
	装 置	34,624	17,312	17,312				フェムト秒レーザー装置
	設 備	0						
	研究費	4,920	2,460	2,460				18.研究費の支出状況参照
平成 28 年度	施 設	0						
	装 置	0						
	設 備	0						
	研究費	9,300	5,304	3,996				18.研究費の支出状況参照
平成 29 年度	施 設	0						
	装 置	0						
	設 備	6,119	4,079	2,040				卓上5軸加工装置(受注生産品)
	研究費	6,300	3,570	2,730				18.研究費の支出状況参照
平成 30 年度	施 設	0						
	装 置	0						
	設 備	0						
	研究費	6,300	3,525	2,775				18.研究費の支出状況参照
令和 元 年度	施 設	0						
	装 置	0						
	設 備	0						
	研究費	6,800	3,863	2,937				18.研究費の支出状況参照
総 額	施 設	0	0	0	0	0	0	0
	装 置	34,624	17,312	17,312	0	0	0	0
	設 備	6,119	4,079	2,040	0	0	0	0
	研究費	33,620	18,722	14,898	0	0	0	0
総 計	74,363	40,113	34,250	0	0	0	0	

法人番号	221009
------	--------

17 施設・装置・設備の整備状況（私学助成を受けたものはすべて記載してください。）
 《施設》（私学助成を受けていないものも含め、使用している施設をすべて記載してください。）（千円）

施設の名 称	整備年度	研究施設面積	研究室等数	使用者数	事業経費	補助金額	補助主体
光産業創成大学院大学 本館居室 A棟実験室 B棟共通実験室他	平成15年度	180m ²	6	7	0	0	0

※ 私学助成による補助事業として行った新增築により、整備前と比較して増加した面積

_____ m²

《装置・設備》（私学助成を受けていないものは、主なもののみを記載してください。）（千円）

装置・設備の名称	整備年度	型番	台数	稼働時間数	事業経費	補助金額	補助主体
(研究装置) フェムト秒レーザー装置	平成27年度	Astrella-F-1K	1	440 h	34,624	17,312	私学助成
(研究設備) 卓上5軸加工装置(受注生産品)	平成29年度	卓上5軸加工装置受注生産品	1	99 h	6,119	4,079	私学助成
(情報処理関係設備)				h			
				h			
				h			
				h			
				h			
				h			
				h			
				h			
				h			

18 研究費の支出状況（千円）

年 度	平成	27	年度	積 算 内 訳	
小 科 目	支 出 額	主 な 使 途	金 額	主 な 内 容	
教 育 研 究 経 費 支 出					
消耗品費	2,940	レーザー用光学部品	2,940	レーザー用ミラーおよびその治具類等	
光熱水費					
通信運搬費					
印刷製本費					
旅費交通費					
報酬・委託料					
()					
計	2,940				
ア ル バ イ ト 関 係 支 出					
人件費支出 (兼務職員)					
教育研究経費支出					
計	0				
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)					
教育研究用機器備品	1,980	エアコン、パワーメーター、IRビューワー、集塵機、遮蔽ブース	1,980	エアコン(200×2)、パワーメーター(650)、IRビューワー(330)、集塵機(200)、遮蔽ブース(400)	
図 書					
計	1,980				
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出					
リサーチ・アシスタント					
ポスト・ドクター					
研究支援推進経費					
計	0				

法人番号

221009

年 度	平成 28 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費	2,112	実験用光学素子・治具・ワーク等	2,112	アッテネーターおよび加工光学系作成用光学部材およびその治具、レーザー用ミラー、加工試験用ワーク等
光 熱 水 費				
通 信 運 搬 費				
印 刷 製 本 費				
旅 費 交 通 費	870	国際会議等に関する海外出張および海外企業訪問移動費、参加費および宿泊費	870	国際会議参加費用、海外にて海外企業との連携に関する打ち合わせ(3名分)
報 酬 ・ 委 託 料 ()				
計	2,982			
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人 件 費 支 出 (兼 務 職 員)				
教 育 研 究 経 費 支 出 計	0			
設 備 関 係 支 出 (1 個 又 は 1 組 の 価 格 が 5 0 0 万 円 未 満 の も の)				
教 育 研 究 用 機 器 備 品	6,318	空間光位相変調器、ガルバノスキャナー	6,318	空間光位相変調器、ガルバノスキャナー一式
図 書				
計	6,318			
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント				
ポスト・ドクター				
研究支援推進経費				
計	0			

年 度	平成 29 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費	4,287	実験用光学部材、治具・ワーク等	4,287	アッテネーター改良用および倒立顕微鏡型加工装置作成用光学部材、加工ワーク等の購入
光 熱 水 費				
通 信 運 搬 費				
印 刷 製 本 費				
旅 費 交 通 費				
報 酬 ・ 委 託 料 ()				
計	4,287			
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人 件 費 支 出 (兼 務 職 員)				
教 育 研 究 経 費 支 出 計	0			
設 備 関 係 支 出 (1 個 又 は 1 組 の 価 格 が 5 0 0 万 円 未 満 の も の)				
教 育 研 究 用 機 器 備 品	2,013	特注架台、ワーク走査用自動ステージ式	2,013	特注架台、倒立顕微鏡作成用自動ステージ式
図 書				
計	2,013			
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント				
ポスト・ドクター				
研究支援推進経費				
計	0			

年 度	平成 30 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費	2,928	実験用光学部材、治具・ワーク等	2,928	
光 熱 水 費				
通 信 運 搬 費				
印 刷 製 本 費				

		法人番号		221009
旅費交通費 報酬・委託料 ()	525	国際会議・国内学会・海外企業訪問移動費、参加費および宿泊費	525	国際会議参加費用、海外にて海外企業との連携に関する打ち合わせ、国内学会参加移動・宿泊費
計	3,453			
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人件費支出 (兼務職員) 教育研究経費支出 計	0			
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)				
教育研究用機器備品 図 書	3,347	レーザー光源、分光器、パワーメーター、光学素子	3,347	半導体レーザースターターキット、パワーメーター、ミニ分光器、アイソレーター
計	3,347			
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター 研究支援推進経費 計	0			

年 度	令和 元 年度			
小 科 目	支 出 額	積 算 内 訳		
		主 な 使 途	金 額	主 な 内 容
教 育 研 究 経 費 支 出				
消 耗 品 費 光 熱 水 費 通 信 運 搬 費 印 刷 製 本 費 旅 費 交 通 費 報 酬 ・ 委 託 料 () 計	2,872 1 2,873	実験用光学部材、治具・ワーク等 郵送費	2,873 1	ワーク用治具、ワーク、ミラー、観察用レンズなど 学会発表用書類送付
ア ル バ イ ト 関 係 支 出				
人件費支出 (兼務職員) 教育研究経費支出 計	0			
設 備 関 係 支 出(1個又は1組の価格が500万円未満のもの)				
教育研究用機器備品 図 書	3,927	光源、光学素子、センサー類購入費		対物レンズ、光学テーブル、半導体レーザー、波面センサー、コントローラ類(自動ステージ、センサー)
計	3,927			
研 究 ス タ ッ フ 関 係 支 出				
リサーチ・アシスタント ポスト・ドクター 研究支援推進経費 計	0			