

# 博士学位論文

レーザーによる微細複雑形状加工における  
プルーム挙動の定量可視化と加工能率向上および  
産学連携を成功に導く実践共同体の事例研究

光産業創成大学院大学

光産業創成研究科

安田浩一郎





# 博士論文要旨

## レーザーによる微細複雑形状加工における プルーム挙動の定量可視化と加工能率向上および 産学連携を成功に導く実践共同体の事例研究

本論文は、超短パルスレーザー加工の高精度化、生産性向上を実現するための技術的指針の獲得を目的とした加工中のプルームの定量可視化技術の開発および加工能率向上を実現する指針について論じるとともに、開発を確度高く成功に導く産学連携の方策について枠組みとして実践共同体論を用い、自身の産学連携の推進事例を基に考察している。

世界的に環境問題が注目される中、自動車部品業界は排気ガスのクリーン化及び燃費の向上などへの取り組みが重要な課題として認識されるようになってきた。これらのニーズに応えるため、微細孔や微細溝などの微細形状を低コストに加工する技術が要求されており、レーザー加工をはじめとする生産技術の研究や量産導入が盛んに行われている。

レーザー加工技術は、近年、非熱加工が可能となるパルス幅 10 ps 以下の超短パルスレーザーの実用化による数  $\mu\text{m}$  レベルの高精度加工の実現と、高繰り返し化による高能率化により、産業利用が拡大している。しかしながら、高繰り返し化によるパルス間隔の短時間化により、加工点から発生するプラズマや金属蒸気等のプルーム（噴出物）が後に続くレーザーパルスとの干渉が発生するようになり、加工能率低下や面粗度悪化を招く課題が指摘されている。そのメカニズム解明としてプルームの後続レーザーパルスに対する影響を定量評価するべく屈折率や吸収係数を定量把握する必要があるが、従来はシュリーレン法などの定性的で低い解像度の可視化手法しかなかった。そこで本研究では、超短パルスレーザー加

工におけるplumeの屈折率と吸収係数を定量的に評価する手法の構築を新たに行い、これを用いた加工能率向上の指針獲得を目指すことにした。

plumeの定量可視化については、大きさが0.1 mmレベルの微細形状加工におけるplumeの屈折率と吸収係数の空間二次元分布の定量的計測を目標とした。そのために、位相シフト干渉法を基とした高速計測が可能な偏光高速度干渉法を活用し、拡大光学系や光源の位置を最適化するとともにレーザーの照射タイミングと撮像タイミングを同期させることで、直径1.5 mmの空間に対しplumeの屈折率と吸収係数を時間分解能1  $\mu\text{s}$  で可視化可能な観察システムを具現化した。これにより、成長し離散していくplumeの挙動を、中心部の高屈折領域から周辺雰囲気との境界部の低屈折領域まで初めて鮮明に捉えることに成功した。さらに、plumeが照射20  $\mu\text{s}$  後も残存し、次のレーザーパルスの照射に影響を与え、特に狭隘部を伴う形状加工ではplumeが狭隘部内に滞留し加工への影響がより大きくなることを突き止めた。

加工能率の向上については、plumeとレーザー光の干渉を回避するために、plumeが加工面から垂直方向へ支配的に噴出する特徴を踏まえ、レーザーを加工面に対し斜めに入射する方法を検討し、加工能率向上への影響を実験的に検証した。その結果、plumeが噴出される角度の幅概ね25度よりも大きい角度でレーザーを入射させることにより、垂直入射時の1.28倍の加工能率向上を達成した。

以上のような加工プロセスに踏み込んだ現象解析を基にした技術開発は、高度な専門知識が要求されるため、民間企業に所属する筆者が光産業創成大学院大学に入学して本研究を実施したような産学連携が重要となる。そこで、本研究では大学と企業の専門知識や強みを組合せ技術開発に成功した産学連携の事例を調査分析することにより、産学連携を成功に導く仕組みやその特徴を明らかにすることを目指した。

筆者＝研究者 X が光産創大で実施した研究行為に関し、観測者自身が観察対象に入り込み観察対象の詳細情報を入手できる方法である内部観測法に基づいて、筆者＝研究者 X の研究行為を議事録やメモを手掛かりにセルフエスノグラフィにより記述し、また関係者にインタビューを実施し、実践共同体論の枠組みで考察した。その結果、研究者 X は研究中に生起する不測の課題に対し、解決するために必要な知識や技術を考え、それを習得するために師事する熟達者を柔軟に入れ替え新しい実践共同体を産みだしながら進め成功に導いていることが明らかとなった。また、研究の「場」である光産創大は教員間の垣根なく大学一体となって成果を出し学生を教え育てるという風土があり、それが故に実践共同体を柔軟に変容させたり産み出したりできることが明らかとなった。この風土は大学の存在目的や博士（光産業創成）の意味付けに関する議論が、開学から現在に至るまで教員間で脈々と続けられていることが理由の一つであると考えられる。

以上本論文では、光産業の重要な技術となる加工点可視化の実現と、産学連携を成功に導く方法の解明について述べた。これら可視化技術及び加工能率向上手段と産学連携の方法論は、レーザ加工プロセスの理解が深まることによる研究開発の加速、生産性向上によるレーザ加工の産業利用の拡大という光産業の創成につながり、さらに産学連携推進の円滑化による継続的なイノベーションにより光産業の更なる発展につながるものである。

## **Abstract**

### **Quantitative imaging and process efficiency improvement of a laser ablation process and analysis of successful industry-academia cooperation based on the theory of communities of practice**

This paper discusses the development of the quantitative visualization technology for plumes during machining to acquire the technical guidelines to improve the accuracy and productivity of the high-precision, ultra-short pulse laser machining. Additionally, it utilizes the community practice theory as a framework for discussing the measures aimed at the industry-academia collaboration that will lead to a highly successful development, based on the author's own promotion of the industry-academia collaboration.

In the automobile industry, cleaning the exhaust gas and improving the fuel consumption are recognized as important factors. To meet such needs, low-cost machining of fine shapes, including micropores and fine grooves is required, and studies on the production technology, such as laser machining and mass production are actively conducted.

In recent years, laser processing technology has expanded in terms of industrial use due to the realization of ultra-short pulse lasers with pulse widths of 10 ps or less, enabling non-thermal processing to realize high-precision machining at a level of several  $\mu\text{m}$  and high efficiency with a high repetition rate of laser pulses. However, owing to the pulse interval becoming shorter due to the higher repetition rate, plumes (ejections), such as plasma and metal vapors generated from the processing point interfere with the subsequent laser pulses, resulting in

a decrease in the processing efficiency and deterioration in the surface roughness. Although it is necessary to quantitatively understand the refractive index and absorption coefficient to evaluate the effect of the plume on subsequent laser pulses, only qualitative and low-resolution visualization methods, including the Schlieren method have been available thus far. Therefore, in this study, I developed a new method to quantitatively evaluate simultaneously the refractive index and absorption coefficient of the plume in ultra-short pulse laser machining, aimed at obtaining guidelines to improve the machining efficiency.

For the quantitative visualization of the plume, I aimed to quantitatively measure the spatial two-dimensional distribution of the refractive index and absorption coefficient of the plume in the micro-shape processing at 0.1-mm resolution. For this purpose, I optimized the position of the extended optical system and the light source, and synchronized the laser irradiation timing with the imaging one by utilizing high-speed polarized interferometry, measuring the refractive index and absorption coefficient of the plume simultaneously at a time resolution of 1  $\mu$ s for a space of 1.5 mm in diameter. As a result, the behavior of the growing and discrete plume was clearly captured for the first time from the high refractive region at the center to the low refractive region at the boundary between the surrounding atmospheres. Furthermore, the plume persisted even after 20  $\mu$ s of irradiation, affecting the irradiation of the next laser pulse and stayed in the narrow part, and the effect on the processing became larger, especially in shape machining with narrow parts.

To avoid the interference between the plume and the laser beam, a method of injecting the laser at an angle to the machined surface was investigated based on the fact that the plume is predominantly ejected from the machining surface in the vertical direction, and the effect on the improvement in the machining



efficiency was experimentally verified. As a result, by injecting a laser at an angle larger than about 25 degrees in width of the angle at which the plume was ejected, the machining efficiency was 1.28 times higher than that at normal incidence.

Since technological development based on the above-mentioned phenomenon analysis requires advanced expertise, industry-academia collaboration is important, as in the case of the author, who belongs to a private company but entered The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries (hereafter GPI) in conducting this study. This study aims to clarify the mechanisms and characteristics that lead to a successful collaboration between the industry and academia by surveying and analyzing the previous such collaborations that have succeeded in the technology development by combining the expertise and strengths of the school and company.

Regarding the research activities conducted by the author (i.e., researcher X) at GPI, based on the internal observation method, wherein the observer himself can enter the observation target and obtain detailed information regarding the same, researcher X described their research activities by autoethnography using minutes and memos, conducted interviews with the parties concerned, and considered the same within a practical community theory framework. As a result, it became clear that researcher X considered the knowledge and skills necessary to solve the unforeseen problems arising during the research, and to acquire these knowledge and skills, they flexibly changed their group of skilled peers to create a new community of practice leading to success. In addition, it became clear that GPI, i.e., the research “location,” has a culture in which the students can be educated without barriers among the faculty members, making it possible to flexibly transform and create practical communities. A major reason for this climate is that

the discussions on the purpose of existence of the school and the meaning of Ph.D. at GPI have continued to date.

In this paper, I describe the realization of the processing point visualization, an important technology in the photonics industry, and the elucidate how to lead a successful industry-academia collaboration. These visualization techniques and processing efficiency improvement methods contribute to development of the photonics industry through improved productivity in the laser processing field. Further contribution of industry-academia collaboration methodologies will be expected for continuous innovations in photonics industries.

# 目次

第1章 序論.....	1
1-1. はじめに .....	1
1-2. 背景 .....	2
1-2-1. 自動車産業を取り巻く環境の変化 .....	2
1-2-2. 自動車部品の中の微細加工の役割 .....	7
1-2-3. 世の中の微細加工技術とレーザー加工技術の位置づけ .....	9
1-3. レーザ加工技術の歴史と課題 .....	11
1-3-1. レーザ加工技術の歴史.....	11
1-3-2. レーザ加工技術の課題.....	15
1-4. 産学連携の重要性と課題.....	18
1-4-1. 民間企業の研究開発推進における課題 .....	18
1-4-2. オープンイノベーションの重要性と産学連携 .....	19
1-4-3. 産学連携の課題.....	23
1-5. 研究目的 .....	24
1-6. 本論文の構成.....	25
第1章の参考文献 .....	27
第2章 偏光高速度干渉法を活用したブルーム挙動定量可視化技術の開発と加工能率向上 の指針明確化.....	30
2-1. はじめに .....	30
2-2. ブルーム可視化に関する先行研究と課題 .....	31
2-2-1. シャドウグラフ法.....	31
2-2-2. シュリーレン法.....	33
2-2-3. レーザ干渉法 .....	36
2-3. 偏光高速度干渉法を活用したブルーム可視化.....	38
2-3-1. 位相シフト干渉法の原理と課題 .....	39
2-3-2. 偏光高速度干渉法を用いた高速観察.....	41
2-3-3. 偏光高速度干渉法を活用したブルーム可視化装置 .....	45
2-4. ブルーム挙動の定量可視化と加工への影響 .....	47
2-4-1. 単発レーザー照射時におけるブルーム可視化結果 .....	47
2-4-2. 高繰返し垂直レーザー照射時におけるブルーム可視化結果.....	55
2-4-3. 狭隘領域へのレーザー照射時におけるブルーム可視化結果.....	58
2-5. レーザのブルームとの干渉回避による加工能率向上.....	62
2-6. まとめ.....	64
第2章の参考文献 .....	67

第3章 産学連携を成功に導く実践共同体の事例研究 .....	69
3-1. はじめに .....	69
3-2. 産学連携に関する先行研究 .....	70
3-3. 分析枠組み：実践共同体論 .....	72
3-4. 研究方法：内部観測法 .....	75
3-5. 事例研究 .....	79
3-5-1. 事例の概要 .....	79
3-5-2. 事例の記述 .....	80
3-5-3. 事例における実践共同体 .....	90
3-6. まとめ .....	99
第3章の参考文献 .....	101
第4章 結論 .....	103
4-1. 研究目的と結果 .....	103
4-1-1. 本研究の目的 .....	103
4-1-2. 方法 .....	103
4-1-3. 本研究の結果 .....	104
4-2. 結論 .....	106
4-3. 光産業創成における本研究の意義 .....	107
4-4. 今後の課題と展望 .....	108
研究業績 .....	110
謝辞 .....	112

# 図表目次

図 1-1	2018年の主要製造業製品出荷額	2
図 1-2	2050年までの世界の自動車保有台数の予測	3
図 1-3	日本の二酸化炭素排出部門別割合(2018年度)	4
図 1-4	世界主要国の自動車排出ガス規制の推移	5
図 1-5	自動車車種別販売台数予測	7
図 1-6	燃料噴射弁に搭載される重要部品の要求寸法、精度	8
図 1-7	微細加工法の精度と能率の関係	10
図 1-8	レーザー加工技術のトレンドと用途	12
図 1-9	市販の発振器のパルス幅、出力比較	15
図 1-10	レーザーエネルギー変化時の除去能率評価結果	17
図 1-11	レーザー加工プロセスの模式図	17
図 1-12	クローズドイノベーションとオープンイノベーションの違い	20
図 1-13	国立大学等における民間企業との共同研究数の推移	22
図 1-14	博士論文の構成	26
図 2-1	シャドウグラフ法の基本構造の模式図	33
図 2-2	シャドウグラフ法を用いたアブレーション過程の可視化例	33
図 2-3	シュリーレン法の基本構造の模式図	34
図 2-4	シュリーレン法を用いたアブレーション可視化例	36
図 2-5	レーザー干渉法を用いたアブレーション可視化例	38
図 2-6	位相シフト干渉法を用いた可視化装置の模式図	41
図 2-7	偏光高速度干渉法を用いた可視化装置の模式図	44
図 2-8	偏光高速度カメラのセンサ模式図	44
図 2-9	実験装置	46
図 2-10	実験結果	49
図 2-11	1回目と2回目のレーザー照射時のプラズマ発光量の比較	50
図 2-12	1回目のレーザー照射時における自発光像と位相差像の比較	50
図 2-13	2回目のレーザー照射時における自発光像と位相差像の比較	50
図 2-14	1回目のレーザー照射時におけるプルームの位相差分布分析結果	51
図 2-15	プルームの屈折率推移評価結果	52
図 2-16	プルームの位相差像と透過像の比較	53
図 2-17	プルームの中心部と上部の透過量分布の比較	54
図 2-18	プルームの中心部と上部の透過量分布の比較	54
図 2-19	高繰返しレーザー照射時の位相差像	56
図 2-20	プルームの噴出速度分析結果	56

図 2-2 1	高繰返しレーザー照射時のワークへのレーザー到達率.....	57
図 2-2 2	実製品加工を模擬したワーク形状とレーザー照射領域の模式図.....	58
図 2-2 3	溝加工時のブルーム可視化結果及び垂直レーザー照射時との比較.....	59
図 2-2 4	溝加工時と垂直レーザー照射時の屈折率推移分析結果.....	60
図 2-2 5	垂直レーザー照射時と溝加工時の加工能率評価結果.....	61
図 2-2 6	レーザー照射角度変化時の加工能率評価結果.....	63
図 3-1	実践共同体の概念図.....	74
図 3-2	複数の実践共同体が作用する種類.....	74
図 3-3	参与観察と非参与観察の違い.....	76
図 3-4	内部観測法の概念図.....	77
図 3-5	事例における関係者.....	80
図 3-6	研究者=実務者 X が行った研究の推移.....	89
図 3-8	2016 年 8 月 共同研究開始時点の実践共同体.....	91
図 3-9	2017 年 11 月時点の実践共同体.....	91

# 第1章 序論

## 1-1. はじめに

筆者は所属企業である自動車部品メーカー A 社において、超短パルスレーザーを用いた微細加工技術の開発に携わっている。レーザー加工技術は近年の技術進歩により産業利用が加速度的に進み、今後も更なる高精度化、生産性向上が期待されている。また、技術開発のプロセスの視点で見ると、近年の技術の複雑化高度化により企業単独での技術開発は限界を迎え、社内外の知識や技術を組合せ共創することでイノベーションを起こすことが必要不可欠となっている。

このため、筆者のミッションは、成長著しいレーザー加工技術の産業発展に貢献するために、社外連携の一手段である産学連携を推進しながら、レーザーアブレーション過程を中心とした加工プロセスに踏み込んだ新たな技術を開発し、レーザー加工技術の発展ならびに自動車をはじめとした産業発展に貢献することである。

本章では、1-2. でまず本研究の背景として自動車産業をとりまく環境変化と微細加工の役割及びレーザー加工技術の位置づけ、1-3. でレーザー加工技術の課題と研究目的を説明する。加えて、1-4. で産学連携の重要性と課題について述べる。最後に1-5. で研究目的を述べ1-6に本論文の構成を示す。

## 1-2. 背景

### 1-2-1. 自動車産業を取り巻く環境の変化

1900年代初頭に欧米で勃興した自動車産業[1]は、第二次世界大戦後の高度経済成長とともに日本の主要産業として大きく発展してきた。図1-1に日本自動車工業会が調査した日本における主要製造業の製造費出荷額の内訳を示す[2]。自動車の製品出荷額は2018年において62兆3,040億円にのぼり、これは全製造業のうち最も多く、全体の18.8%を占める。今後も自動車産業の発展性に関して、図1-2に米エネルギー情報局(IEA)が調査した2050年までの世界の自動車保有台数の予測を示す[3]。主にOECD非加盟国、つまり新興国において継続的に需要が拡大し、2050年代までに年間3000万台の保有台数増加が見込まれている。以上のことから、自動車産業は、日本経済を支える重要な基幹産業であり、今後も成長が見込まれる将来性の高い産業である。

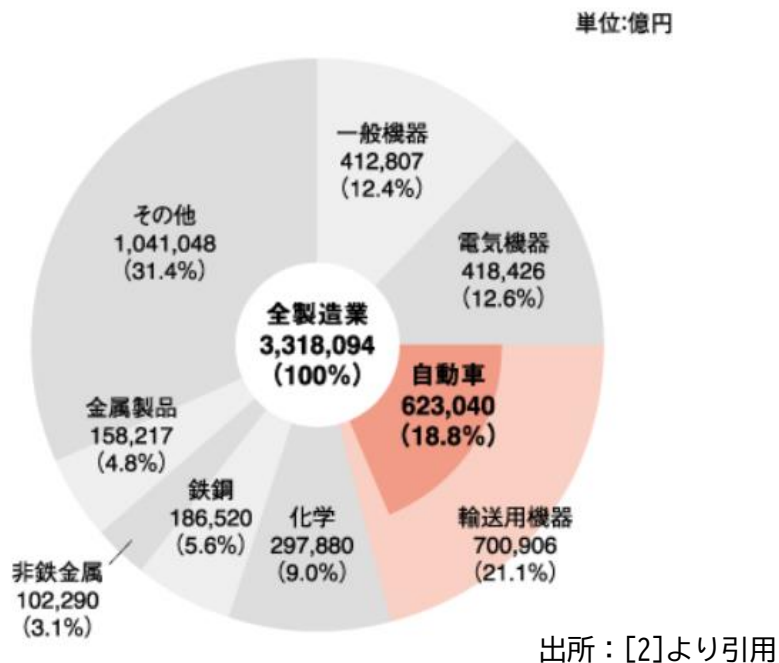
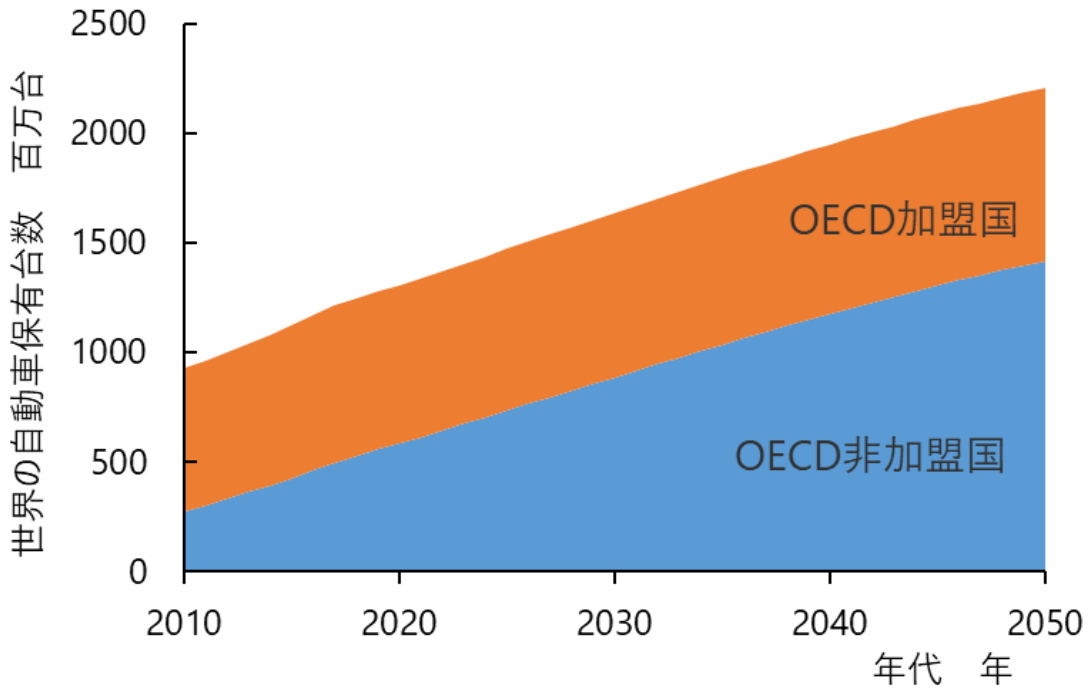


図 1-1 2018年の主要製造業製品出荷額



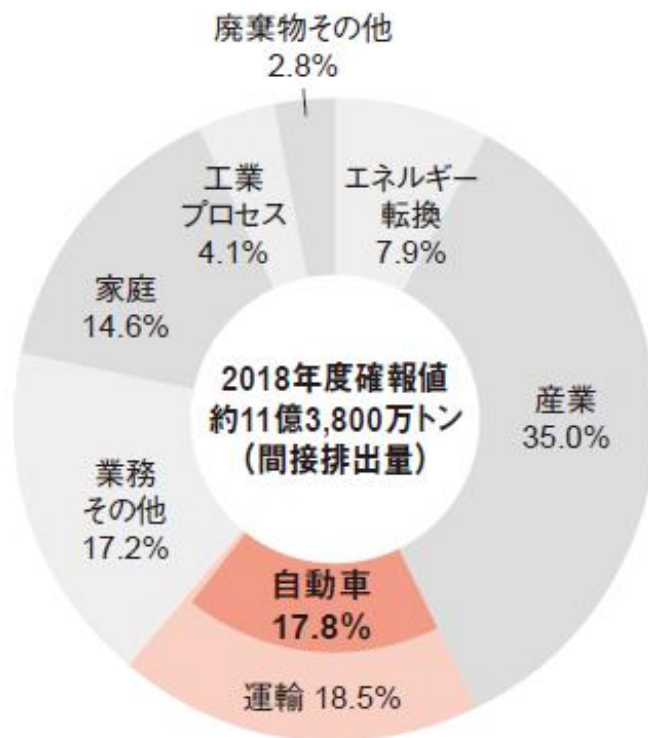


出所：[3]をもとに筆者編集

図 1-2 2050 年までの世界の自動車保有台数の予測

一方、人間活動による地球環境変動は生活を脅かすまでになっており[4]、地球環境保全が人類の生活維持のために看過できない重要な課題となってきている。中でも文明の発展によって増え続けてきた温室効果ガス、特に二酸化炭素の排出削減は喫緊の課題としてとらえられており、産業全体での二酸化炭素の排出削減が叫ばれている。2021年11月に開催されたCOP26（国連気候変動枠組条約第26回締約国会議）では、地球環境を維持するためには産業革命前と比べた世界の平均気温上昇を1.5度に抑えることが必要であると示し、2030年までに世界全体の二酸化炭素排出量を2010年比で45%削減することを目標に掲げ、締約国に具体策を求めることが決議された[5]。これに先立ち日本では、2020年10月26日、菅総理大臣より2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにすることを宣言し[6]、「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」[7]など具体的な実行計画の策定と実施に着手している。

自動車産業も地球温暖化に大きな影響を与えている。環境省が調査した2018年度の日本における二酸化炭素排出量の産業部門別の割合を図1-3に示す[2]。運輸部門の二酸化炭素排出量は全体の19%を占め、このうちの9割近くが自動車から排出される[2][8]ため、自動車の二酸化炭素排出削減は重要な課題となっている。

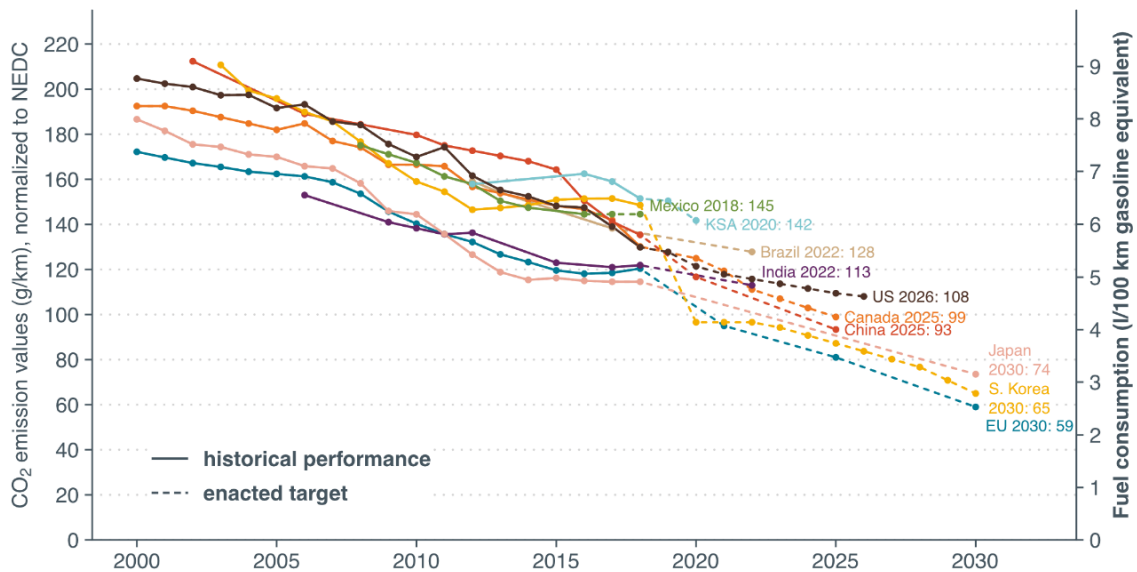


出所：[2]より引用

図 1-3 日本の二酸化炭素排出部門別割合（2018年度）

このような温室効果ガスの排出削減意識の高まりの元、世界各国の自動車排出ガス規制は厳しさを増している。世界の乗用車の二酸化炭素排出規制値の動向をまとめたものを図1-4に示す[9]。二酸化炭素排出規制ではEUが最も厳しく、2021年に1km走行当たりが発生する二酸化炭素の許容量が95gであるのに対し、2030年には59gまで削減することが求められている。これは、内燃機関のみの自動車では達成できない数値であり、ハイブリッド車を含む電動化へ

のシフトが必要不可欠な規制となってきた。その他にも販売台数の一定割合を内燃機関非搭載の電動車両にすることを義務づける規制として、アメリカのカリフォルニア州大気資源局（CARB）のZEV（Zero Emission Vehicle）規制や中国政府のNEV（New Energy Vehicle）規制があり、一定割合の電動車を販売できなければ罰金が課されるようになりつつある[10]。さらに、2015年のフォルクスワーゲン社のディーゼル乗用車排出ガス不正[11]の反動から、2017年イギリスとフランスの両政府から内燃機関を搭載する自動車の製造・販売を2040年以降禁止することが表明され[12]、これを皮切りに、2021年のCOP26には30か国が2040年までに内燃機関搭載車禁止を宣言している[5]。以上のように、地球環境保護の観点から、自動車に対する温室効果ガスの規制は厳しさを増し、内燃機関のみでは対応が困難な状況になってきている。

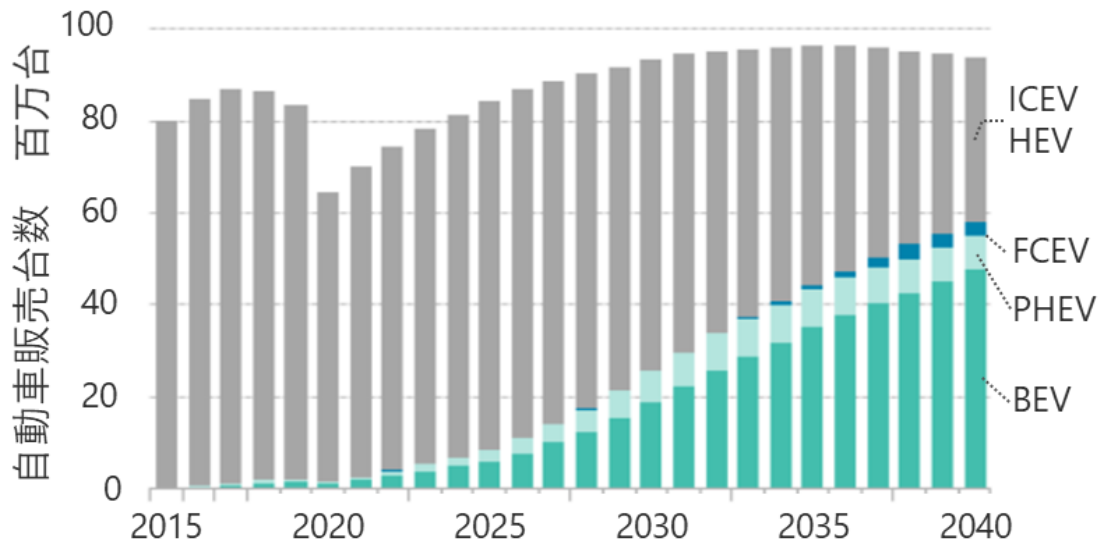


出所：[9]より引用

図 1-4 世界主要国の自動車排出ガス規制の推移

このように厳しさを増す環境規制に対応するため、自動車メーカーは様々なパワートレインの開発が求められている。図 1-5 に 2040 年までの自動車の車種別販売シェア予測を示す[13]。2021 年現在では世界の自動車の 95%以上が、内燃機関のみを搭載する自動車 (ICEV: Internal-Combustion Engine Vehicle) または内燃機関と駆動用モータを併せ持つハイブリッド車 (HEV: Hybrid Electric Vehicle) で占められている。一方将来の動向に関しては、前述の規制強化や内燃機関の製造販売禁止宣言を受け、外部電源により充電が可能なハイブリッド車であるプラグインハイブリッド車 (PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle)、モータとバッテリーのみで構成される電気自動車 (BEV: Battery Electric Vehicle)、さらには水素等の燃料により発電しながら走行する燃料電池自動車 (FCV: Fuel Cell Vehicle) が急速に増えると予想されている。

しかし全てが内燃機関非搭載車に置き換わるわけではなく、2040 年時点でも内燃機関搭載車は 50%近く存在すると予想されている[14]。その理由は、内燃機関非搭載車はリチウムイオン電池を主とした車載電池の価格が高いが故に車両コストが既存の内燃機関搭載車に比べ高く、今後の市場拡大が見込まれる OECD 非加盟国には普及しづらいという購入時のコスト面の問題や充電インフラの整備が追い付かないといった使用環境の問題の他、化石燃料を用いた発電方法が依然として主流であり、電動車両に置き換わったとしても二酸化炭素排出量が低減できないことが挙げられる。したがって、長期的にみると内燃機関は縮小傾向にあるが、今後 20 年は依然として主要な駆動源として残ると推定される。このため自動車業界は、電動化に対する開発を行いつつも内燃機関の高効率化による性能向上を進めなければならない状況である。



出所：[13]を基に筆者編集

図 1-5 自動車車種別販売台数予測

## 1-2-2. 自動車部品の中の微細加工の役割

自動車部品には様々な微細加工が施されており、そのどれもが性能を決定づけるキーとなっている。本項では、内燃機関における微細加工の役割について述べる。

内燃機関はエンジン気筒内に微粒化された燃料が噴射され、燃料が空気と混合された後に爆発的に燃焼することで運動エネルギーを取り出す。より少ない燃料で効率よく運動エネルギーを取り出すためには、燃料を完全燃焼させることが重要で、そのためには微粒化された燃料をエンジン気筒内に高精度に均一に噴射することで、燃料と空気を均等に混合させる必要がある。このことから、エンジンの燃焼効率向上には、エンジン気筒内に燃料を噴射させる機能を持つ燃料噴射弁が重要なポイントとなる。燃料噴射弁はエンジンの動作に合わせ数 ms オ

ーダで燃料の流れを緻密に制御し高精度に噴射させる必要があるため、非常に高度な設計技術、製造技術を必要とする。

自動車の性能を左右する燃料噴射弁には様々な微細加工が施されており、性能のキーとなっている。ディーゼルエンジンに搭載されている燃料噴射弁の断面構造および噴射のキーとなる重要部品の要求寸法・精度の一例を図 1-6 に示す。燃料に含まれる異物を除去するための  $\Phi 50 \mu\text{m}$  の微細孔が 2000 孔加工されたフィルターや、燃料の流量を高精度に制御する  $\Phi 170 \mu\text{m}$  のオリフィス、燃料のモレを防ぐ溝幅  $75 \mu\text{m}$  の微細溝、噴霧形状を制御する  $\Phi 100 \mu\text{m}$  の噴孔など、微細孔、微細溝が各所に加工されている。これらの微細孔や微細溝は最小寸法が  $40 \mu\text{m}$  から  $200 \mu\text{m}$  であり、これらの微細形状の出来栄が燃料噴射弁の性能を左右する。以上のことから微細加工は燃料噴射弁のキー技術である。

### ディーゼルコモンレールシステムにおける燃料噴射弁

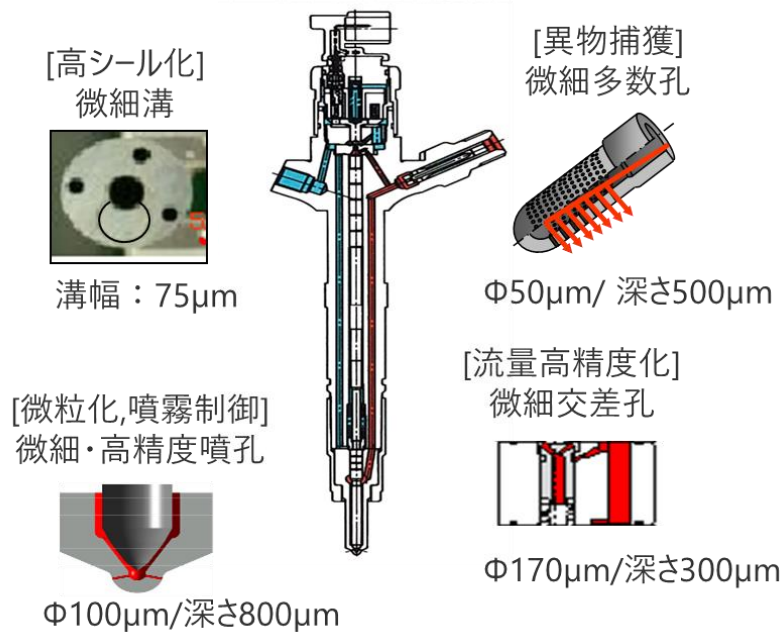


図 1-6 燃料噴射弁に搭載される重要部品の要求寸法、精度

### 1-2-3. 世の中の微細加工技術とレーザ加工技術の位置づけ

性能差別化の重要工法である微細加工技術は加工精度と生産性を両立できないことが課題である一方、レーザ加工技術は近年の技術進歩により精度と生産性両立のポテンシャルがある加工技術となってきた。現在実用化されている除去加工技術に対し、加工精度と加工能率を調査しマップ化したものを図 1-7 に示す。横軸は微細・高精度の指標を表す最小除去量の単位、縦軸は生産性の指標を表す単位時間当たりの除去能率である。除去加工の抽出にあたり、機械加工としてプレス加工・切削加工・研削加工、電気加工として放電加工・電解加工・電子ビーム加工・イオンビーム加工、そしてレーザ加工をそれぞれ挙げた。各加工法について、発表されている研究および量産技術データや設備メーカーが発行しているカタログ値から推定した。

機械加工は、工具を用いて材料に力を加えることで塑性変形させ形状を形作る加工法である。加工能率を高めようとする材料に加える力は大きいものとなり、加工により発生する熱や力を加えたときの変形により加工精度が悪化してしまう。逆に精度を求めようとする材料に加える力を小さくせざるを得ず、加工能率が低くなってしまう。このため、能率と精度が背反となる。

電気加工は、電気エネルギーを加工に直接利用し材料を除去する加工法で、工具と材料に電位差を与え、電子やイオンの衝突や電解作用を用いて材料の除去を行う。加工能率を上げるためには、電子や陽イオンを高密度化する必要があるが、電子や陽イオンは互いに反発し合う性質を持っているため、高密度化に限界が存在する。

レーザ加工は、単一波長の光エネルギーを材料に照射することで熱エネルギーに変換し材料を除去する加工法である。加工能率を高めるためには、光エネルギーを高密度化することが必要であるが、光エネルギーの高密度化は理論上制約がない。この点が電気加工と最も異なる点である。またレーザ照射時間を制御すること

により、レーザー照射による熱エネルギーの材料内部の分布も制御することができ熱影響層のない高精度加工も実現できる。

製造技術の競争力の観点では、高精度と高能率を両立する工法が理想である。この中で、レーザー加工技術は近年の技術進歩により高精度と高能率を両立できる、他工法の分布領域に対して右上の領域に範囲が広がっている。以上のことから、レーザー加工技術が最も技術進歩が著しく高い競争力のポテンシャルをもった加工技術であるといえる。

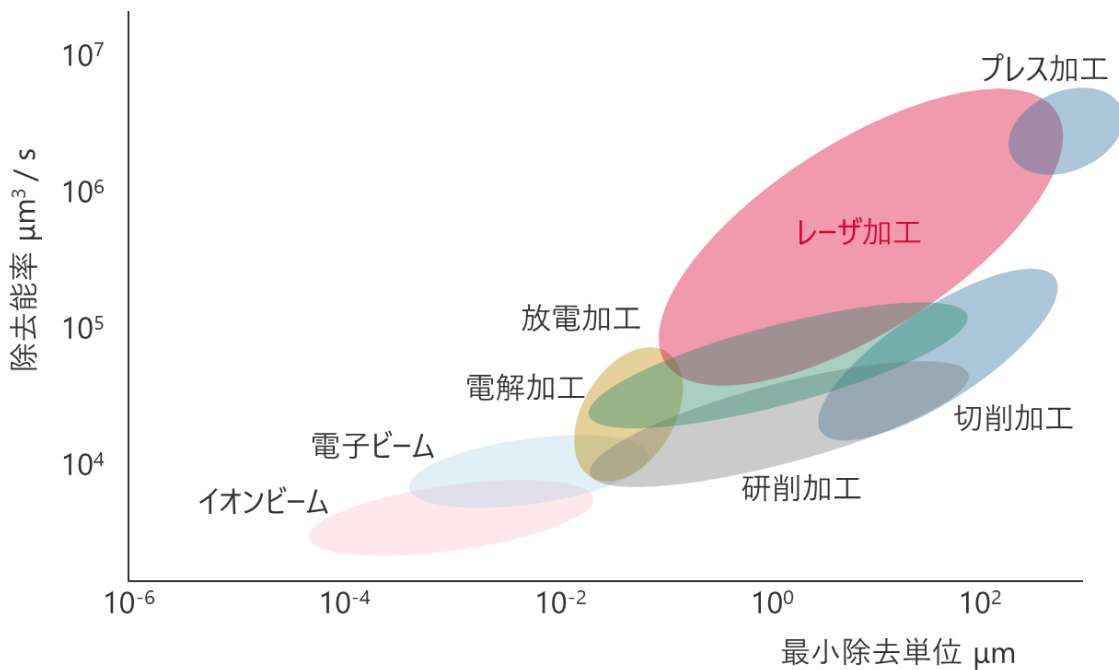


図 1-7 微細加工法の精度と能率の関係



## 1-3. レーザ加工技術の歴史と課題

### 1-3-1. レーザ加工技術の歴史

なぜレーザ加工技術が上記のように技術進歩が著しくポテンシャルが高いのか、これまでの発展の系譜を通し、現在の課題の背景として明らかにする。図1-8にレーザの高出力化とその用途の変遷を示す。横軸はレーザのパルス幅を示し、縦軸のパワー密度はピーク出力が微小領域に集中される程度を示している。レーザは、1960年にマイマングルビー結晶を励起することにより実証した。その後、固体レーザ、ガスレーザ、色素レーザ、半導体レーザ、自由電子レーザなど数えきれない種類のレーザ媒質を用いた発振器が開発され、発振波長は遠赤外線からX線まで網羅するようになっている。これらの発振器の高出力化は著しい。レーザの短パルス化に目を向けてみると、初期のレーザはパルス幅が10 $\mu$ s領域、ピーク出力はキロワット (kW=10<sup>3</sup> W) 領域であった。1962年には、Qスイッチ法が提案され[15]、ナノ秒の時間スケールにエネルギーを集中させられるようになり、レーザ出力はメガワット (MW=10<sup>6</sup> W) の領域に入った。1964年にモード同期法が考案され[16]、パルス幅はさらに短縮されピコ秒領域となり、ピーク出力はギガワット (GW=10<sup>9</sup> W) 領域に達した。さらに1985年にStricklandとMourouによってチャープパルス増幅 (CPA: Chirped Pulse Amplification) 法が発明されることにより[17]、ピーク出力はテラワット (TW=10<sup>12</sup> W) に達した。このように、レーザ発振器はピーク出力を向上させるため、短パルス化を実現する技術が開発されてきた。

レーザ加工の微細加工への適用に対しては、パルス幅がナノ秒からピコ秒に短縮されると異なるアブレーション過程を示すことが発見され[18]、一気に適

用が拡大した。熱影響層を低減した、いわゆる非熱加工による高品質な微細加工の実現である。

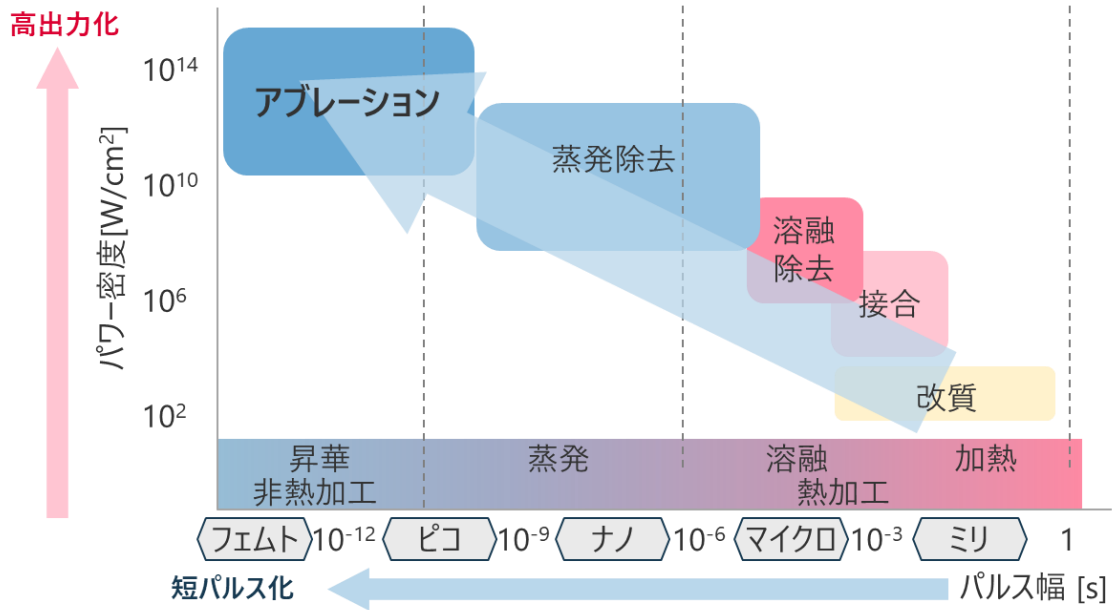


図 1-8 レーザ加工技術のトレンドと用途

金属にレーザーが照射されると、レーザーのエネルギーは逆制動放射により金属中の自由電子に吸収される。光の放射が電子の逆制動、すなわち電子の加速に寄与する吸収過程である。吸収されエネルギーによりその自由電子の速度が高まって高温状態となり、金属中の周囲の電子や格子（イオン）に衝突し、有限の時間内にそのエネルギーを渡すことで周辺が加熱され、レーザー吸収を受けた電子の高かった温度は緩和され周囲へと平衡状態になる。そしてその温度が材料の沸点を超えるとその部分が蒸発して散逸するため、金属除去加工として利用される。この電子系－電子系間の衝突を介した熱エネルギーの移動は、電子の質量が軽いことからその緩和時間が短く素早い熱エネルギーの輸送となるが、電子系－格子

系間の熱伝導は、格子（イオン）系の慣性質量が大きいためにその緩和時間が比して長く、遅めの熱伝導となる特徴がある。

ここでパルス幅がピコ秒レベルになると、レーザー照射時間と同等の加熱の時間が電子系－格子系間の緩和時間と同等かそれより短い時間領域となるため、レーザー加熱領域の格子系への加熱はその緩和時間を経て可能ではあるが、その周囲の格子系への加熱に及ぶ前に電子への熱入力が終わってしまうこととなる。その加熱を強いものにすれば、加熱領域が沸点を超えて蒸発除去が可能となりつつ、その周辺への除去加工に必要な熱の供給は不十分かつ、溶融・再凝固などの熱影響も限定的となる。橋田ら[19]は金属に対する緩和時間を求めている。この結果を表 1-1 に示す。これによると、主要な金属元素の緩和時間は長くても 10 ps 台となっており、パルス幅がピコ秒レベルとなることで緩和時間よりもレーザーの照射時間を短くすることができることを示している。さらに、銅を融点付近 (1356K) まで加熱した際の熱拡散長についても計算によって求めており、パルス幅が 10 ns のレーザーによる加熱の場合熱拡散長が 1.5  $\mu\text{m}$  になるのに対し、フェムト秒レーザーを使用することにより熱拡散長を 329 nm とすることができ、1桁程度短くできることも示している。このことから、レーザーのエネルギー分布を

表 1-1 各元素の緩和時間

出所：[19]より引用

元素	緩和時間 (ps)
Al	1.12
Cu	17.49
Ni	9.63
Pb	3.3
Mo	12.5
Au	25.3
W	6.1
Cr	3.6
Nb	0.73
Ti	0.83

正確に転写できる微細加工が可能となり、周辺の熱影響が抑制された精度の高い加工ができるようになった。

さらに、出力が高出力化されたことにより加工能率向上を実現でき、産業への適用が一気に拡大した。超短パルスレーザー発振器では、Yb をドープした固体の励起媒体を用いてレーザーを発生させるが、出力を高めようとする誘導放出時に発生する熱により熱レンズ効果によるビーム品質低下や媒質の破壊を引き起こしてしまうことが課題であった。そのため媒質の排熱を効率的に行うため、媒質の表面積を増やし積極的に冷却を行う方式の開発が行われてきた。レーザー開発初期は媒質形状が円筒状のロッド形状であったのに対し、媒質を薄い円盤状にするディスク方式、細いファイバーを用いるファイバー方式、薄い長方形状にするイノスラブ方式にすることで媒質の冷却を効率的に行いながら安定した出力増大が可能になった[20][21]。

2021年現在の市販されている発振器の性能を図1-9に示す。横軸にパルス幅、縦軸に出力をとっている。近年では1~10psの領域において100Wを超える発振器が市販化されており、最大で400Wに達するものも販売されている。

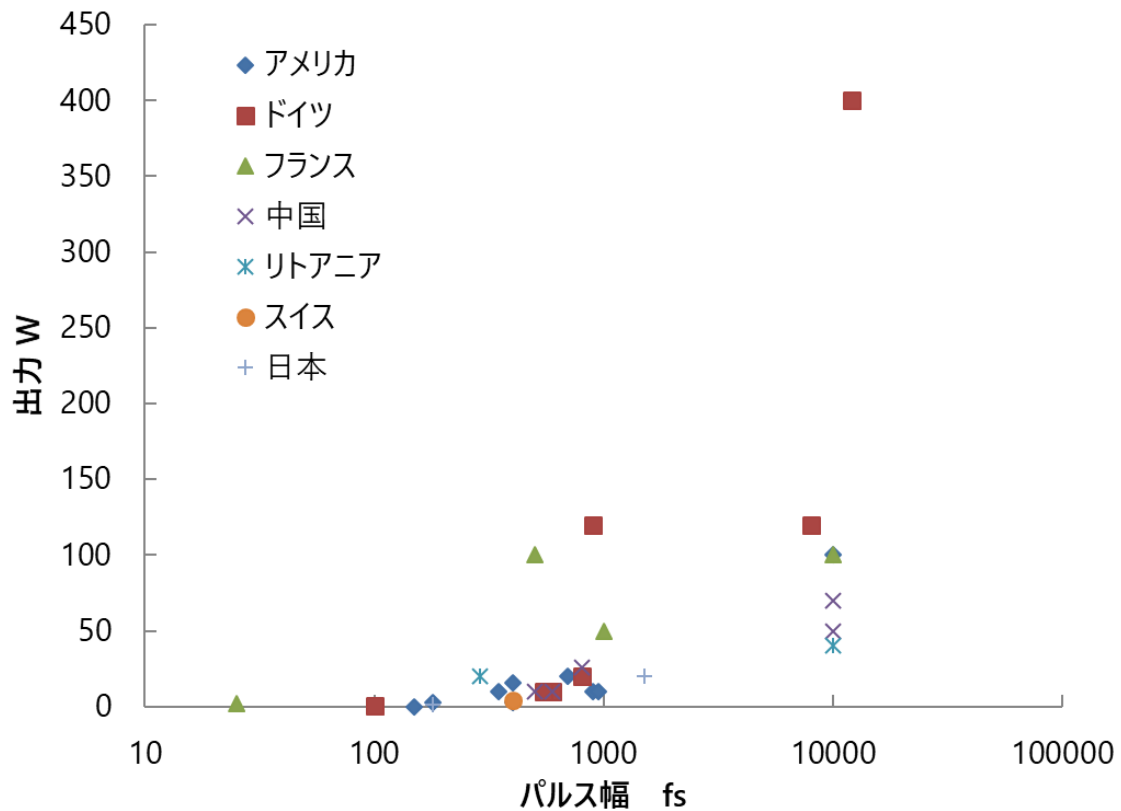


図 1-9 市販の発振器のパルス幅、出力比較

### 1-3-2. レーザ加工技術の課題

レーザー発振器は高出力化、高繰り返し化が進み、より微細で熱影響が少ない加工ができるようになってきているが、このような発振器の能力向上に対し加工能率が追従せず、生産性向上が頭打ちとなる課題が生じるようになってきた。例として、ステンレス鋼に対し投入エネルギーを変化させた時の加工能率を評価した結果を図 1-10 に示す。波長は 1030 nm、パルス幅は 10 ps、集光径  $\Phi 25 \mu\text{m}$  のレーザーを用い、SUS430 の素材に対し投入エネルギーを変化させ各 100 回照射時の加工能率変化を実験により求めた。加工能率の定義は、100 回照射後に形成される除去領域のうち最も深い箇所の深さを測定し、これを照射回数で除したものとした。横軸に照射したレーザーのエネルギー密度、縦軸に除去レートを示す。

この結果を見ると、エネルギーを上げていくと加工能率は頭打ちになり、投入エネルギー増加による加工能率向上は見込めないことが分かる。

この原因は、高繰り返し化によるパルス間隔の短時間化により、加工点から発生するプラズマや金属蒸気のプルーム（噴出物）が続くレーザーパルスと干渉してしまうためであるといわれているが、因果関係は未だ明らかにはされていない。レーザーアブレーションの模式図を図 1-11 に示す。レーザー照射により高温になった加工点から除去された材料がプラズマや金属蒸気、固体微粒子状のデブリとなり噴出する。これらはプルームと呼ばれる。プルームは加工点から拡散しながら噴出していくが、レーザーパルスの時間的な照射間隔が短い場合、プルームが加工点周辺に残存している状態で次のレーザーパルスが照射されてしまうため、レーザー光がプルームに吸収、散乱されてしまいワークへのエネルギー投入が阻害されてしまうと推定される。プルームに関する先行研究は、プルームの中に含まれる固体微粒子の生成過程の分析例や[22]、プルームの生成から消失までの過程を定性的に可視化し、加工への影響を示唆することを明らかにした例[24]が挙げられるが、プルームがレーザー加工の能率や品質に与える影響を定量的に分析した例は存在しない。

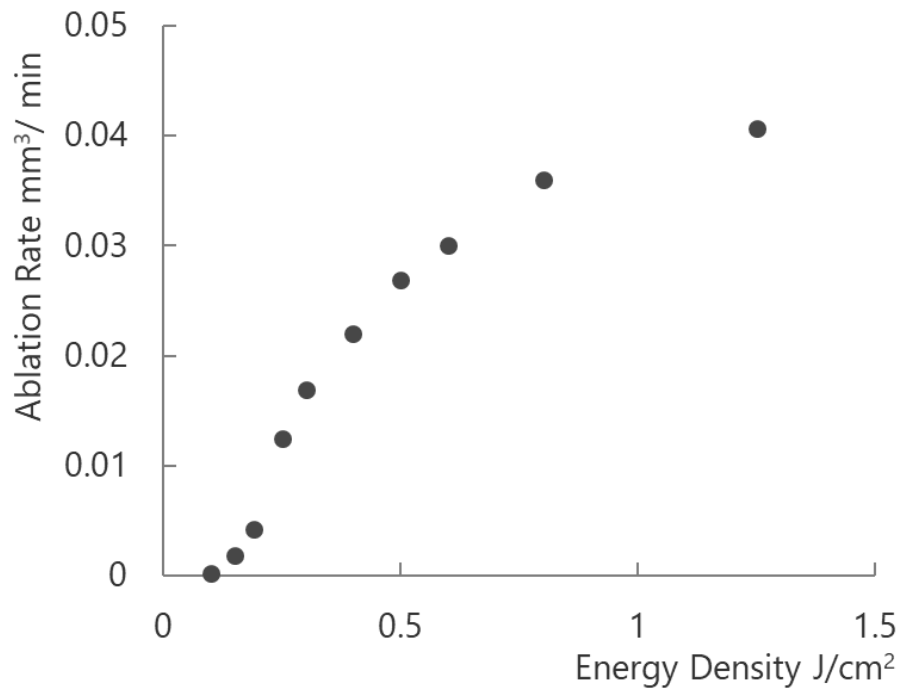


図 1-10 レーザエネルギー変化時の除去能率評価結果

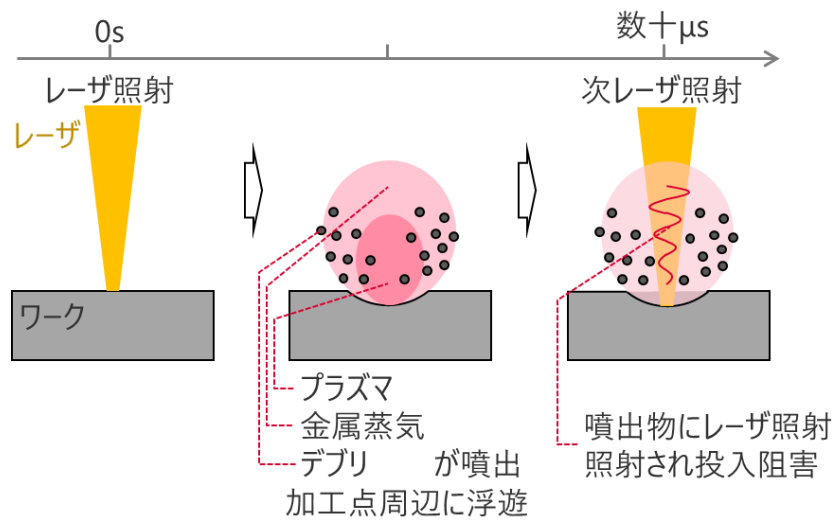


図 1-11 レーザ加工プロセスの模式図

## 1-4. 産学連携の重要性と課題

### 1-4-1. 民間企業の研究開発推進における課題

前節で述べた現象解析をはじめとした基礎研究は、これまで研究機関の他開発費に余力のある大企業で盛んに行われてきたが、技術の高度化や顧客ニーズが多様化した近年では費用対効果を出しにくく、民間企業単独では遂行困難になってきている。民間企業における研究開発は、1900年にゼネラルエレクトリック社（GE）がマサチューセッツ工科大学（MIT）の研究者を引き入れ研究開発拠点を設立したことが始まりだといわれている。その後デュポン社内に設置された基礎研究グループが1935年にナイロンの高分子合成に成功し、社内の研究開発が事業化に大きな貢献を果たすことが証明されたことにより[25]、アメリカでは1950年代から60年代を頂点に有力企業が研究開発拠点を設立した。日本でもそれに追随するように1960年代から70年代を中心に研究所の設立が盛んに行われた。しかし、1980年代になり世界規模での競争が激化したことにより、製品やサービスのライフサイクルは短縮化され、かつコモディティ化を引き起こして価格の低下が起りやすくなり、ライフサイクル内での研究開発費の回収が困難となった。その結果アメリカでは1980年代後半ごろから、日本では1990年代後半から2000年代初頭にかけて大規模な企業内研究開発拠点の閉鎖、縮小、あるいは長期的な視点からより現実的かつ身近な研究テーマへの方向転換がなされるようになった。

しかし、近年ではそれも行き詰まりを迎えている。これまでは既存の自社製品の性能改善等によりすぐに新たな顧客価値を創ることもできたが、技術が成熟したことにより従来の延長線上の身近な研究テーマの推進のみでは他社との差別化が難しくなってしまった。だからといって企業単独で研究を実施しようと



しても、技術自体が高度化し研究開発を遂行しようとする高度な専門技術や知識を持つ人材を抱えなければならず人件費が高騰してしまううえ、市場が成熟し顧客ニーズが多様化しているため、研究行為を行ったとしても企業利益に確実に結び付く可能性が低くなってしまい、研究行為の費用対効果が低くなってしまったためである。以上のことから、企業単独で研究開発を推進することはもはや不可能になりつつある。

## 1-4-2. オープンイノベーションの重要性と産学連携

民間企業単独での研究開発が行き詰まりを迎える一方、インターネットの普及により協働できる環境がそろったこともあり、外部の研究人員や資源を積極活用し自社のイノベーションのスピードアップを図る動きが、欧米では1990年ごろから、日本でも2000年ごろから盛んに行われるようになった。この動きをヘンリー＝ウイリアム＝チェスブローは従来型の企業単独の取組みである「クローズドイノベーション」と比して「オープンイノベーション」と名付けた[26]。チェスブローは、オープンイノベーションについて、「企業内部と外部のアイデアを有機的に結合させ、価値を創造すること」(P8)であると定義しており、①組織の外部で生み出された知識を社内の経営資源と戦略的に組み合わせること、②社内で活用されていない経営資源を社外で活用することによりイノベーションを創出すること、の両方を指すとしている。図1-12にクローズドイノベーションとオープンイノベーションの概念図を示す。「多くの産業において、企業内の『中央研究所』による研究開発は時代遅れとなっている。知識は普及しており、アイデアは急いで活用しなければその価値はなくなってしまう。こうした状況では、社外の知識と社内の研究開発を結合するオープン・イノベーションが必要である」(P186)とチェスブローは主張する。

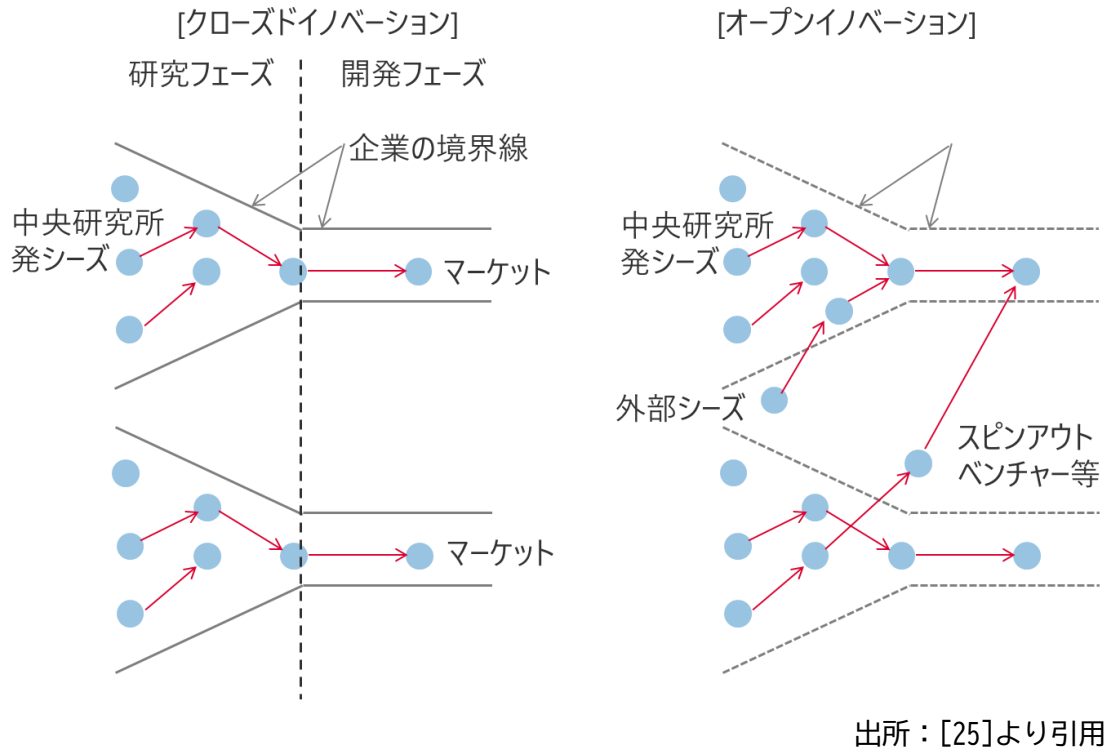


図 1-12 クローズドイノベーションとオープンイノベーションの違い

オープンイノベーションの分類について、チェスブローは「インバウンド型オープンイノベーション」と「アウトバウンド型オープンイノベーション」の2つに整理している。インバウンド型オープンイノベーションとは、企業外部に存在する技術や知識を企業内部に取り入れることによりイノベーションを創出するものである。一方アウトバウンド型オープンイノベーションとは、企業内部に存在する技術や知識を企業外部に発信することで、技術や知識を欲する外部組織と連携することによりイノベーションを創出するものである。

また、オープンイノベーションの連携先について、米山[27]によると、顧客、サプライヤー、競合企業、起業家・スタートアップ企業、大学・公的研究機関、社内・他部門の社員が挙げられる。加藤[28]は、食品・化学、エレクトロニクス、輸送機器、情報通信の各業界合計20社のマネージャークラスの技術者23名を

対象に、研究、創造的開発、ルーチンワーク的开发、生産の各研究フェーズに対し、社外パートナーの重要度についてアンケート調査を行っている。結果を表1-2に示す。この結果から、学問を基軸とした基礎研究のフェーズは研究パートナーとして大学、つまり「学」が適しており、具体的な製品開発や生産といった産業に近いフェーズはグループ企業や顧客企業、サプライヤーといった企業、つまり「産」が適しているとしている。

筆者の研究においては、レーザ加工プロセスの解明という基礎研究に対し、専門知識や技術を企業外部に求めながらイノベーション創出を図るため、研究フェーズに関するアウトバウンド型のイノベーションに分類される。よって以降研究に対するアウトバウンド型イノベーションの連携先として研究機関等の「学」に焦点を絞り議論を進める。

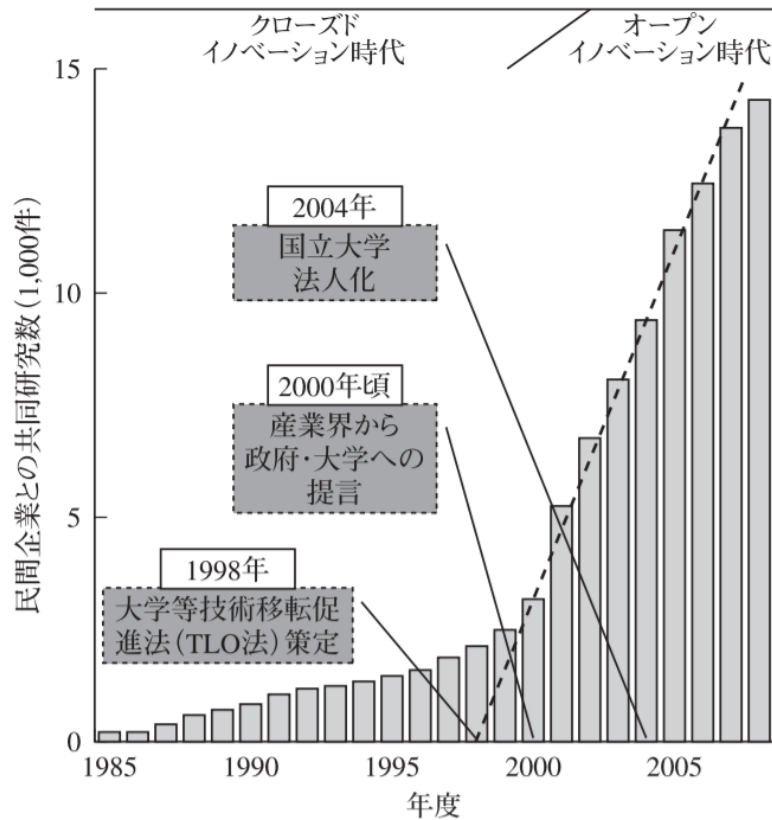
表 1-2 研究フェーズ別社外パートナーの重要度

出所：[27]より引用

	1位	2位	3位
研究	大学	公的研究機関/グループ企業	
創造的開発	公的研究機関/グループ企業		サプライヤ
ルーチンワーク的开发	グループ企業/ サプライヤ		顧客企業
生産	サプライヤ	グループ企業	顧客企業

研究フェーズでのイノベーションの連携先において、大学などの研究機関、つまり「学」が有効な理由は何か。それは、「学」である研究機関に所属の研究者は、各専門分野において高度で最新の知識と技術を有し、それに基づく研究行為を行っている人材であり、こうした人材と共創できれば企業がこのような人材を雇用するコストを負担せずとも研究行為を遂行できるためである。さらに

様々な分野の研究者が国内外に多く存在するため、顧客ニーズの多様化により研究テーマが絞り込みにくい場合でも、適切な「学」の研究者と手を組み連携すれば短期に研究成果を得られることができる。図 1-13 に国立大学等における民間企業との共同研究数の推移を示す[29]。共同研究数は 2000 年頃から大幅に増加し続けていることが分かる。政府も産学連携を促進させるために、1998 年の大学等技術移転促進法（TLO 法）の策定や日本経済団体連合会等の政府・大学への提言を行っており、産学連携が行いやすい体制が整ってきている。



出所：[28]より引用

図 1-13 国立大学等における民間企業との共同研究数の推移

### 1-4-3. 産学連携の課題

このように急速に広まりを見せている産学連携であるが、必ずしもその実践が全てうまくいくわけではなく、残念ながらイノベーション創出に至らないケースも存在する。

その理由として、山田[30]は獲得すべき技術や知識の保有者の探索と連携先との関係構築を挙げている。技術の受け入れ側である「産」においては外部から技術シーズ・アイデアを取り込む立場であり、提携先の探索時において、自社のニーズを明確・適切に提示できない、研究機関等の「学」が有する技術を適切に評価ができないという問題がある。一方、技術を提供する側である「学」においては、自らが有する外部活用可能な技術を適切に発信することができないという問題がある。その結果、最適な連携先に出会えず技術の取り込みができないという状況に陥ってしまう。

こうしたことから、お互いが知った仲である特定の企業と特定の研究者との間で契約交渉が進められる傾向も見受けられる。2017年に実施された『産学連携等実施状況について』では、大学と民間企業間の共同研究について、産学官連携本部棟が組織的に関与した件数は共同研究実施件数全体(8,425件)の28.2%であったと報告しており、大学と企業の産学連携は7割程度が双方の個人的な関係の下(個対個)で構想・実施されていることが明らかとなっている[31]。個対個の連携構築の場合、限られた情報を基とした連携構築になるため「産」のニーズと「学」のシーズの組み合わせが最適にならないことも多く、本質的な連携とは言い難い。

文部科学省もこうした傾向を問題視し、2016年の『産学官連携による共同研究強化のためのガイドライン』において「個対個から組織対組織(の産学連携)」を強調している[32]。しかしその課題として、「大学・国立研究開発法人の『本部機能』が旧態依然としており、部局横断的な連携等が困難である」(P7)と指

摘しており、その解決方針として「大学・国立開発法人の本部（産学連携本部等）において、部局横断的な連携体制を構築し、将来のあるべき社会像等のビジョンを企業とともに探索・共有し、基礎・応用や人文系・理工系等の壁を越えて様々なリソースを結集させて『本格的な共同研究』の企画と提案を行い、実行をサポートすること」（P7）を掲げている。部局横断的な組織対組織の産学連携においては飯田が東京医科歯科大とソニーの組織間連携事例を成功事例として挙げている[33]が、成功事例が少なく、限定的である。

以上のことから、産学連携における課題の一つとして、「産」のニーズと「学」のシーズがマッチしないこと、部局横断的な連携体制が円滑に構築できず、個対個の連携に留まっていることが挙げられる。

## 1-5. 研究目的

筆者の研究のモチベーションは、製品のキーとなる微細形状加工として最もポテンシャルの高いレーザ加工技術の産業利用を促進するため、レーザ加工プロセスを解明し高能率化を実現する手法を具現化することである。それを早期に実現するために、産学連携を推進しながら進めてきた。本論文の研究目的は2つである。第一の目的は、超短パルスレーザを用いた微細形状加工における加工障害を定量的に明らかにする現象可視化技術を開発し高能率化を実現する技術指針を獲得することである。第二の目的は、基礎研究におけるアウトバウンド型オープンイノベーションの手法である産学連携を成功に導く仕組みやその特徴を明らかにすることである。

第一の目的に関しては、自動車部品で主に用いられる SUS430 に対し大きさが 0.1 mm 程度の微細形状加工を超短パルスレーザ加工で行った時の加工障害を明らかにするために、プルームの屈折率と吸収係数を定量的に評価する手法の構築を目指す。まず屈折率と吸収係数を定量的に評価できる可視化手法を確

立する。そして確立した可視化手法により、平板による基礎的な可視化評価を行い、ブルームの噴出の傾向を評価する。次に実製品加工を模した狭隘部を伴う形状加工時のブルームを可視化し、加工阻害量を定量的に評価する。以上の結果から今後の更なる高精度化、生産性向上のための技術的指針を獲得する。

第二の目的である産学連携を成功に導く仕組みやその特徴を明らかにするために、民間企業に所属する筆者が光産業創成大学院大学（以下光産創大）に入学して産学連携を推進しながら研究行為を行い、成功に導いた事例を調査分析する。内部観測法に基づき筆者が光産創大で実施した研究行為を自ら記述し、関係者にインタビューを実施し、実践共同体論の枠組みで考察を行う。これにより、産学連携を成功に導く仕組みやその特徴を明らかにする。

## 1-6. 本論文の構成

本論文の構成は全4章により構成される。その構成図を図1-14に示す。

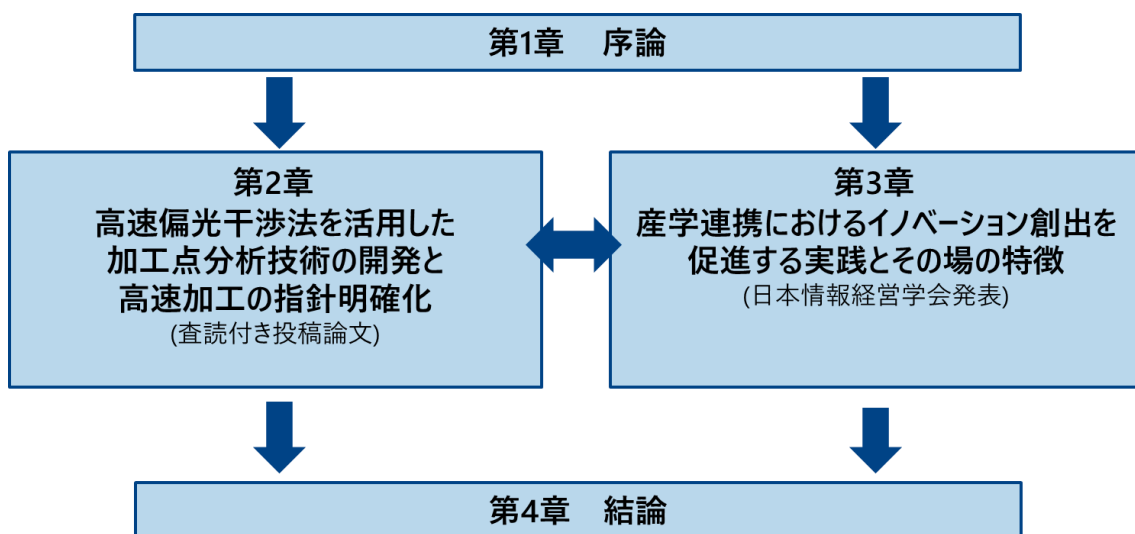
第1章は研究背景と論文全体の目的および構成について述べる。

第2章は、超短パルスレーザーを用いた微細形状加工のブルームによる加工阻害を定量的に評価する可視化手法の開発について論ずる。ブルームの可視化に関する先行研究を調査した結果について述べ、従来手法の課題を整理する。次に今回新たに提案する偏光高速度干渉法の原理について述べる。そして平板による基礎的な可視化評価の結果および狭隘部を伴う形状加工時のブルーム可視化結果について説明する。最後に可視化結果に基づいて加工能率向上を実現する手段と効果の検証結果について示し、今後の更なる高精度化、生産性向上のための技術的指針をまとめる。

## 第1章-序論-

第3章は、産学連携を成功に導く仕組みやその特徴について研究した結果を論ずる。産学連携に関する先行研究を調査した結果について述べ、産学連携の課題を整理するとともに、今回分析枠組みとして用いた実践共同体論と、研究方法として用いた内部観測法について説明する。次に筆者が光産創大で行った研究行為をセルフエスノグラフィにより記述し、関係者に対するインタビュー調査の結果も踏まえ、産学連携を成功に導いた要因を分析する。それを基に産学連携を成功に導く仕組みやその特徴を考察し、実践的含意をまとめる。

第4章は本論文のまとめである。本論文をまとめ、結論を述べるとともに、今後の展開について述べる。





## 第1章の参考文献

- [1] 樋口健治, 自動車メカニズムの歴史とその周辺科学の発展, Vol.83, No.740, p.839-846, 1980.
- [2] 日本自動車工業会, 日本の自動車工業 2020, 2020.  
[https://www.jama.or.jp/industry/ebook/2020/book\\_j/book.pdf](https://www.jama.or.jp/industry/ebook/2020/book_j/book.pdf) (2022-01-10 最終閲覧)
- [3] 米エネルギー情報局 (EIA), International Energy Outlook2021, 2021  
<https://www.eia.gov/outlooks/ieo/> (2022-01-10 最終閲覧)
- [4] 環境省, 環境白書, 2020  
<https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r02/index.html> (2022-01-10 最終閲覧)
- [5] 環境省, 国連気候変動枠組条約第26回締約国会議 (COP26), 京都議定書第16回締約国会合 (CMP16) バリ協定第3回締約国会合 (CMA3) について, 2021  
<http://www.env.go.jp/earth/26cop2616cmp16cma10311112.html> (2022-01-10 最終閲覧)
- [6] 菅義偉, 第二百三回国会における菅内閣総理大臣所信表明演説, 2020  
[https://www.kantei.go.jp/jp/99\\_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html](https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/statement/2020/1026shoshinhyomei.html)  
(2022-01-10 最終閲覧)
- [7] 経済産業省, 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, 2020  
<https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/seichosenryakukaigi/dai6/siryou2.pdf>  
(2022-01-10 最終閲覧)
- [8] 地球環境研究センター, 日本温室効果ガスインベントリ報告書, 2021  
[https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/jqjm1000000x4g42-att/NIR-JPN-2021-v3.0\\_J\\_GIOweb.pdf](https://www.nies.go.jp/gio/archive/nir/jqjm1000000x4g42-att/NIR-JPN-2021-v3.0_J_GIOweb.pdf) (2022-01-10 最終閲覧)
- [9] 国際クリーン交通委員会 (ICCT), Passenger vehicle fuel economy, 2020  
<https://theicct.org/> (2022-01-10 最終閲覧)
- [10] 松島憲之, 大転換期に入った自動車業界, 月刊資本市場, No.397, 2018.
- [11] 松村祐二, フォルクスワーゲンにおける大規模リコール問題ーグローバル競争の視点からの考察ー, 商学集志, Vol.86, No.2, p.173-193, 2016.
- [12] 細矢浩志, 欧州自動車産業の電動化戦略の現状と課題, 産業学会研究年報, Vol.2020, No.35, p.111-129, 2020.
- [13] Bloomberg NEF, Electric Vehicle Outlook 2021, 2020  
<https://about.bnef.com/blog/electric-vehicle-sales-to-fall-18-in-2020-but-long-term-prospects-remain-undimmed/> (2022-01-10 最終閲覧)
- [14] 国際エネルギー機関 (IEA), Energy Technology Perspectives 2020, 2020.

[https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy\\_Technology\\_Perspectives\\_2020\\_PDF.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/7f8aed40-89af-4348-be19-c8a67df0b9ea/Energy_Technology_Perspectives_2020_PDF.pdf) (2022-01-10 最終閲覧)

- [15] F. J. McClung and R. W. Hellwarth, "Giant Optical Pulsations from Ruby," Appl. Opt. 1, p.103-105, 1962.
- [16] L.E. Hargrove, R.L. Fork, and M.A. Pollack, "LOCKING OF He-Ne LASER MODELS INDUCED BY SYNCHRONOUS INTRACAVITY MODULATION" APPL. PHYS. LETT. Vol.5, No.4, 1964.
- [17] D. Strickland and G. Mourou, "COMPRESSION OF AMPLIFIED CHIRPED OPTICAL PULSES" Opt. Commun. Vol. 56, No.3, p.219-221, 1985.
- [18] C. Chalendar, V. Detalle, S. Kocon, J. L. Lacour, C. Nouvellon, P. Mauchien, B. Salle and A. Semerok. "Experimental investigation of Laser ablation efficiency of metals". Proc.of SPIE Laser Surface Processing, Vol. 3404, No.97, p.432-440, 1998.
- [19] 橋田昌樹, 藤田雅之, 節原裕一, "フェムト秒レーザーによる物質プロセッシング" 光学 Vol.31, No.8, p.621-628, 2002.
- [20] 古瀬裕章, "固体レーザー材料", Journal of Plasma and Fusion Research, Vol. 97, No. 6, p.335-339, 2021.
- [21] 北島将太郎, "高出力レーザー及び最新動向", Journal of Plasma and Fusion Research, Vol. 97, No. 7, p.388-395, 2021.
- [22] 岡田龍雄 レーザーアブレーションプラズマのダイナミクスとアブレーションによる物質合成, 光学 Vol. 31, No. 8, p.606-615, 2002.
- [23] B. Benedikt and J. Finer, "In-situ analysis of ultrashort pulsed laser ablation with pulse bursts." Journal of Laser Micro Nanoengineering, Vol.14, No.1, p88-94, 2019
- [24] I. Mingareev and A. Horn, "Time-resolved investigations of plasma and melt ejections in metals by pump-probe shadowgraphy" Appl Phys A, 92, p.917-920, 2008.
- [25] 榊原清則, "1. 日本の製造業企業の課題と展望." 映像情報メディア学会誌 68.6, p.435-439, 2014.
- [26] H. Chesbrough, "Open Innovation: the New Imperative for Creating and Profiting from Technology", Harvard Business School Press, Boston, 2003. (大前恵一郎訳, "OPEN INNOVATION: ハーバード流イノベーション戦略のすべて", 産業能率大学出版部, 2004.)
- [27] 米山茂美, 渡部俊也, 山内勇, 真鍋誠司, 岩田智, "日米欧企業におけるオープン・イノベーション活動の比較研究", 学習院大学経済論集, Vol.54, No.1, p.35-52, 2017.

- [28] 加藤みどり, "R&D のアライアンス・アウトソーシングの実践: パートナーの戦略的活用による人材育成と相互学習の深化 (< 特集> 「オープン・イノベーション」 の再検討).", 研究 技術 計画, Vol.25, No.1, p36-46, 2010.
- [29] 池川隆司, "オープンイノベーション時代における産学連携.", 電子情報通信学会誌, Vol.94, No.7, p573-578, 2011.
- [30] 山田仁, "今, オープンイノベーションが必要となる背景と課題, 政府の取組について." 産学連携学, Vol.12, No.2, p43-47, 2016.
- [31] 文部科学省, 平成 29 年度 大学等における産学連携等実施状況について, 2017. [https://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/sangaku/1413730.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/sangaku/1413730.htm) (2022-01-10 最終閲覧)
- [32] 文部科学省, 産学連携による共同研究強化のためのガイドライン, 2016. [https://www.mext.go.jp/component/a\\_menu/science/detail/\\_icsFiles/afieldfile/2016/12/27/1380912\\_02.pdf](https://www.mext.go.jp/component/a_menu/science/detail/_icsFiles/afieldfile/2016/12/27/1380912_02.pdf) (2022-01-10 最終閲覧)
- [33] 飯田香緒里, 渡邊守, 古澤智子, 谷関知佳, 矢田博昭, 安田章夫, "イノベーション創出を目指す『本格的な産学連携』に関する考察: 東京医科歯科大とソニーの組織間連携事例を用いて.", 産学連携学, Vol.17, No.2, p.139-146, 2021.

## 第2章 偏光高速度干渉法を活用したプルーム 挙動定量可視化技術の開発と加工能率向上の指 針明確化

### 2-1. はじめに

本研究の目標は、超短パルスレーザーによる微細形状加工中におけるプルームの挙動を定量評価できる可視化技術を開発すること、これを用いて加工品質や能率への影響を定量化すること、可視化結果に基づき能率向上の指針を得ることである。本節では、本研究の前提について実験に使用する素材と加工に用いるレーザーの主な諸元を示し、可視化により得たい情報、それらを踏まえた可視化装置の開発目標について述べる。

本研究における加工対象は、自動車部品においてレーザー加工が多く用いられているステンレス鋼とし、実験には SUS430 を用いた。使用するレーザーは波長 1030 nm, パルス幅 10 ps のものを使用した。短波長、短パルスの発振器も市販化されている中で、この条件を選んだ理由は、この条件が発振器の高出力化のトレンドの中で最も高出力化が著しく、生産性向上を狙う場合有利であるためである。

次に可視化により得たい情報について説明する。本研究における現象可視化の目的は、レーザー照射時に発生するプルームがどれくらい加工を阻害するかを明らかにすることである。プルームは自発光を伴うプラズマの他、発光を伴わない金属蒸気やデブリから構成される。これらにレーザーを照射した時、レーザーが屈折した吸収されることで加工品質や能率が悪化すると推定される。このため、レーザー加工中に発生するプルームの屈折率及び吸収率を定量値として得ることを目標とした。

最後にこれらを踏まえ可視化装置の開発目標を設定した。まず可視化する領域については、実製品の形状やアシストガスなどの設備の形状から直径 1.5 mm の範囲を可視化できることを目標とした。また、時間分解能については、主に用いるレーザの繰返し周波数が 100kHz であるため、この条件下でレーザ照射間のプルーム挙動を把握できるよう時間分解能は 5  $\mu$ s とした。以上のように、超短パルスレーザ加工中のプルームの挙動を可視化し加工品質と能率への影響を評価するために、直径 1.5 mm の領域に関し、時間分解能 5  $\mu$ s で、屈折率と吸収率を定量的に測定できる装置を開発することを目標とした。

## 2-2. プルーム可視化に関する先行研究と課題

レーザ加工中のプルームの挙動については、シャドウグラフ法、シュリーレン法、レーザ干渉法が用いられてきたが、いずれもプルームの定性的な挙動は分かるものの定量的な評価には至っていない。本節では各可視化手法の基本原理と課題について説明する。

### 2-2-1. シャドウグラフ法

シャドウグラフ (shadowgraph, 影絵) 法は、密度勾配のある部分を通過する光は速度差から密度の高い側に屈折するという光の性質を利用して、密度変化が生じる流れを影絵として可視化する手法で、1800 年、Dvorak によって火炎の影写真を得るために発明された[1][2]。図 2-1 にシャドウグラフ法の基本構造の模式図を示す。気体中で光が屈折する場合、密度を  $\rho$ 、光の屈折率を  $n$  とすると、 $n \propto \rho$  の場合、

$$\rho C = n - 1 \quad (1)$$

という関係がある。ここで、 $C$ はグラッドストーン・ディル定数であり、気体の種類と波長により異なる定数である。(1)式から、気体の密度と屈折率には相関があり、光が密度のムラをもった気体中を伝播する際、屈折率が増加する方向、すなわち気体の密度が増加する方向に偏向することが分かる。

この性質を利用して、気体などの透明体の測定対象に対し平行光を通過させスクリーンに投影すると、測定対象と大気間の密度差、つまり測定対象の境界や、測定対象内部の密度の変化をスクリーン上の照度変化として観察でき、例えば衝撃波のような密度の不連続的变化を明瞭に可視化することができる[2][3]。しかしこの方法では、測定対象と大気の屈折率差が小さい場合明暗の変化が微小であること、現実には光学系の精度限界から平行光線の屈折と散乱が混ざってしまうことにより明瞭に観測できず定性的な情報しか得られないことが課題である。

田辺らはシャドウグラフ法を用いてレーザ加工時の衝撃波の挙動の可視化を試みている[4][5]。この可視化像を図2-2に示す。衝撃波と空気の境である最も密度変化が大きい部分は境界がはっきりと表れているが、噴出物の内部の微小な密度変化は明暗の差がほとんど現れていないことが分かる。以上のことから、シャドウグラフ法は簡素な構造で可視化できる長所がある一方、屈折率等の定量的な評価には適切ではない。

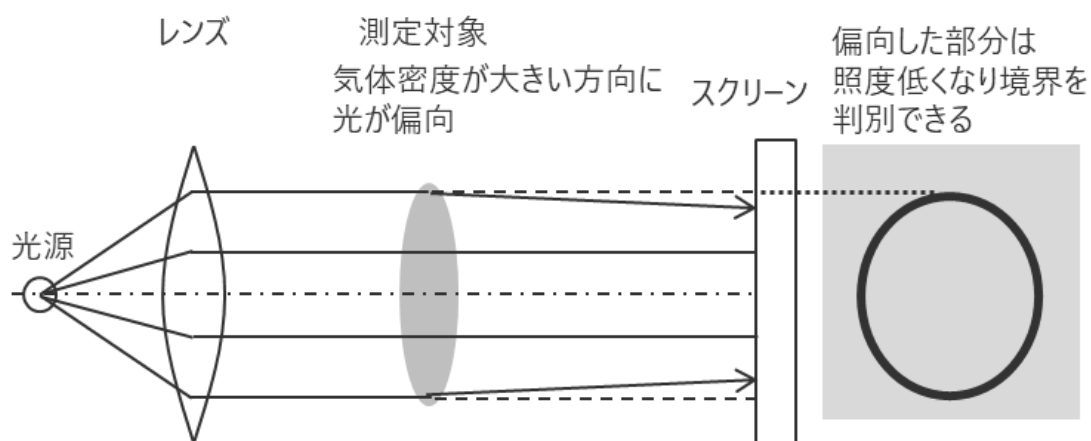
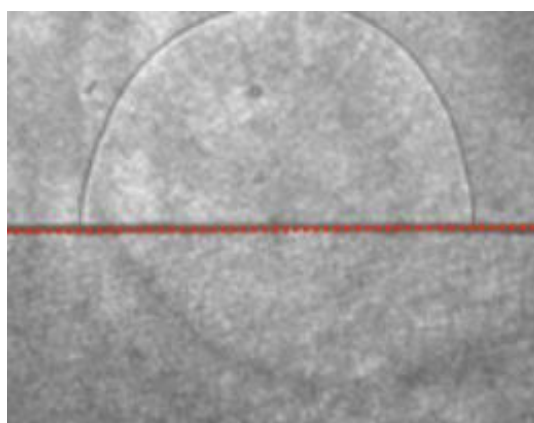


図 2-1 シャドウグラフ法の基本構造の模式図



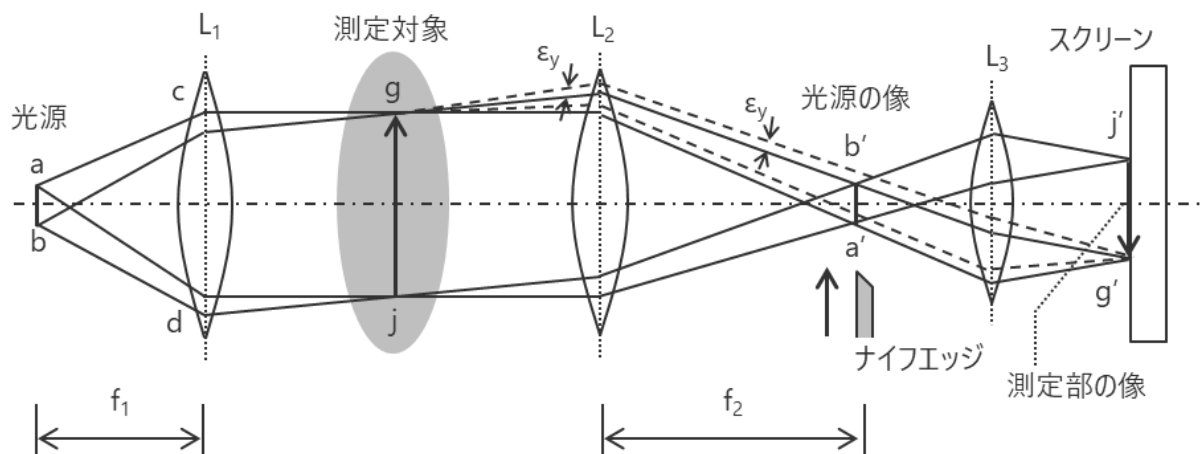
出所：[4]より引用

図 2-2 シャドウグラフ法を用いたアブレーション過程の可視化例

## 2-2-2. シュリーレン法

シュリーレン (独語 Schiere, 条痕) 法は, 1964 年テプラーによって光学用ガラスの検査を行うために発明された[6]. 測定原理は, シャドウグラフ法と同じく光の屈折を利用した観測方法であるが, 密度変化のない部分を透過した光を遮ることで, 密度変化のある部分を透過した光のみを測定できるため, 測定対象

の屈折率変化を明暗としてより明瞭に観測できる特徴がある[3][4]. 図2-3にシュリーレン法の基本的配置を示す.



出所：[6]を基に筆者作成

図 2-3 シュリーレン法の基本構造の模式図

図中の左端が光源である. 光源の点 a から発生した光を例にとると, 点 a から発生した光はレンズ  $L_1$  を通過することで平行光となり, 測定対象を通過し, レンズ  $L_2$  により  $a'$  に焦点を結ぶ. 同様に光源上の他の点からの光束も  $L_2$  の焦点面に焦点を結び, 光源  $ab$  の像  $a'b'$  が得られる. また, 測定部の像  $gj$  はレンズ  $L_2$ ,  $L_3$  によりスクリーン上に焦点を結び像  $g'j'$  が得られる. 屈折率に変化がない場合, 直線  $gj$  上を通る光は全て光源  $a'b'$  に重なることが分かる. ここで,  $a'b'$  上にナイフエッジ (knife edge) と呼ばれる仕切板を置き  $a'b'$  を通過する光の一部を遮ると, スクリーン上の測定部の像は一様に暗くなる. この状態で測定部に流れが生じると, 図の破線で示すように点  $g$  で  $y$  方向に  $\varepsilon_y$  だけ曲げられ, ナイフエッジの位置における光源の像の  $y$  方向の変位は,



$$\Delta h = f_2 \varepsilon_y \quad (2)$$

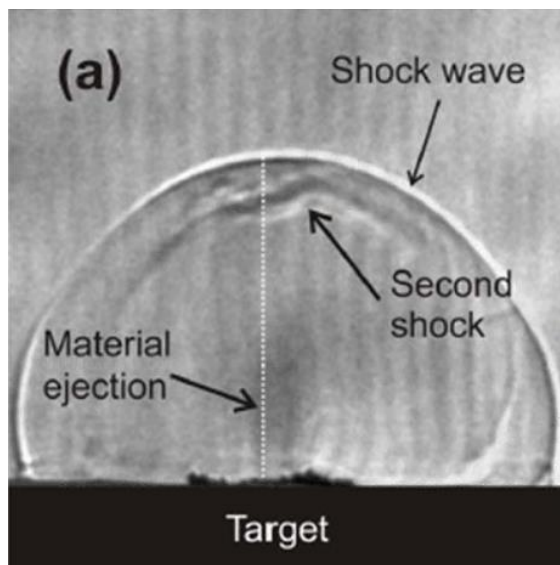
となる。よって変位  $\Delta h$  に比例する明るさ  $\Delta E$  がスクリーン上の像に加えられる。この元の明るさ  $E$  に対する  $\Delta E$  の比をコントラストと定義すれば、グラッドストーン・デイル定数  $C$ 、測定部の幅  $L$  としたときの光線のふれ角と密度勾配の関係式

$$\varepsilon_y = CL \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \quad (3)$$

を用いて、コントラストは以下の式で表される。

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta h}{h_1} = \frac{f_2 \varepsilon_y}{h_1} = \frac{f_2 CL}{h_1} \frac{\partial \rho}{\partial y} \quad (4)$$

この式から、スクリーン上の像のコントラストは、ナイフエッジに垂直方向の密度勾配に比例することが分かる。図 2-4 にシュリーレン法を用いたアブレーション可視化例を示す[7]。アブレーションにより発生した衝撃波と空気の境界部は屈折率の変化が大きい領域でありナイフエッジに遮られず明るく映るため、衝撃波の境界部の形状を可視化することができる。しかし、シュリーレン法も測定対象の密度勾配を光の光量として求める性質上、密度の正確な値を求めることが難しく、シャドウグラフ法と同じく定性的な情報しか得られないことが課題である。



出所：[7]より引用

図 2-4 シュリーレン法を用いたアブレーション可視化例

### 2-2-3. レーザ干渉法

レーザ干渉法は、レーザ光路を2つに分岐・合流させて干渉縞を発生させる光学系を用い、一方の光路上に測定対象を置くことで、測定対象の密度変化等による屈折率変化に応じ干渉縞がずれる特性を利用して測定対象の密度を計測する方法である[8].

測定対象の屈折率を  $n$  とし、測定対象領域外の大気中の屈折率を  $n_0$  とすると、測定対象を通るプローブ光と測定対象を通らない参照光との光路長の変化  $\Delta L$  は測定対象の長さを  $d$  とすると以下の式で表される。

$$\Delta L = (n - n_0)d \quad (5)$$

第2章-偏光高速度干渉法を活用したブルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

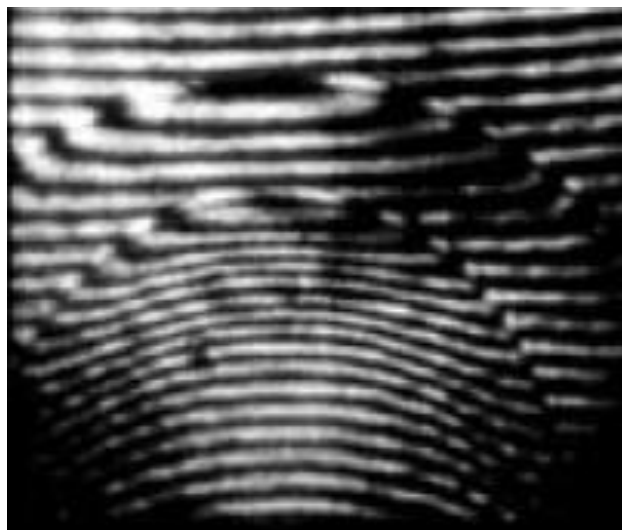
干渉縞は測定対象がない場合は直線状に見えるが、測定対象の領域は光路差が発生する分干渉する点がずれるため、測定対象における干渉縞は測定対象がない箇所に比べずれて見える。特に測定対象の屈折率  $n$  が大気中の屈折率  $n_0$  よりも大きい場合、プローブ光側にずれる。ずれる量は、例えば測定対象の屈折率変化により光路差が1波長分変化すると干渉縞の明暗の周期がもとの屈折率の領域と比較し1周期分ずれる。このため干渉縞の明暗の周期がずれた数を  $N$  とすると、 $N$  と  $\Delta L$  の関係は以下の式で表される。

$$N = \frac{\Delta L}{\lambda} = \frac{(n - n_0)d}{\lambda} \quad (6)$$

ここで  $\lambda$  はレーザー光の波長である。 $N$  は干渉縞がプローブ光側にずれた場合を正とする。屈折率  $n$  と気体密度  $\rho$  の関係は、グラッドストーン・ディルの式より、

$$n \cong 1 + \frac{\rho C}{M} \quad (7)$$

と表される。ここで、 $M$  は気体の分子量で  $C$  (グラッドストーン・ディル定数) とともに固定値であるため、気体密度と屈折率は相関があり、屈折率の変化に応じて干渉縞が移動し干渉縞の移動量から測定対象の屈折率の変化を計算することができる。図2-5にレーザー干渉法を用いた可視化例を示す[9]。屈折率の測定分解能を高めるためには干渉縞を細かくすることが必要になる半面、認識精度が低下する背反がある。また、微小で連続的な屈折率変化を伴う場合、干渉縞も微小に変化するため、変化量を捉えづらい課題がある。



出所：[9]より引用

図 2-5 レーザ干渉法を用いたアブレーション可視化例

### 2-3. 偏光高速度干渉法を活用したプルーム可視化

前節まででレーザ加工プロセスの可視化手法について概観したが、従来法ではレーザ加工中のプルームの定性的な可視化例はあるものの、屈折率及び吸収率を定量的に可視化した例はない。一方、物体の屈折率や吸収率を可視化する手法に関しては、透明体などの固体、すなわち静止した物体の屈折率及び吸収率を定量計測する手法として位相シフト干渉法が挙げられる。この方法は、測定対象を通るプローブ光と基準となる参照光の位相をシフトしながら3枚以上の画像を取得し測定対象の屈折率を求める方法である。位相をシフトさせなければならぬためこれまでは動く物体の可視化には用いられてこなかったが、近年ではこの方法を活用し動く物体の屈折率変化を計測するために、3枚以上の位相差像を1枚の像で計測する方法がいくつか提案されている。複数台のカメラを用

いて複数の位相差像を撮影するもの[10][11], ホログラフィック素子 (HOE) を用いて1台のカメラにおける画像の4象限に3枚以上の位相差像を生成するもの (HOE方式) [12], 光源に複数波長を用いそれぞれの位相差から測定対象の位相差像を生成するもの (多波長ワンショット法) [13], カメラの画素ごとに異なる方位の偏光素子をもった偏光板をもった偏光カメラを用いて1枚のカメラ像を画素ごとに分解し位相差像を生成するもの (偏光高速度干渉法) [14]である. この中で, HOE方式と多波長ワンショット法は特殊な光源や光学系の導入が必要であり高コスト化すること, 複雑な光学系のため調整難易度が高く産業利用しづらいという課題がある. 一方, 偏光高速度干渉法は, 近年の偏光素子製造技術の向上により偏光高速度カメラが実用化していること[15][16], 位相シフト干渉法で用いられる光学系の構成と類似の系で具現化可能であるため, 本方法を活用すれば研究目標を達成できると考えた.

本節では位相シフト干渉法と今回の研究で用いる偏光高速度干渉法の原理を説明し, それを活用しレーザ加工プロセス中のブルーム可視化に特化し開発した可視化装置について説明する.

### 2-3-1. 位相シフト干渉法の原理と課題

位相シフト干渉法は, 計測対象領域を通過させるプローブ光と, 位相を複数回変化させた参照光との干渉像からプローブ光の位相情報を計測する手法である[17]. 本項では位相シフト干渉法の中で最も一般的な4画像法の原理と課題について説明する. 図2-6に位相シフト干渉法の模式図を示す. プローブ光と参照光を(8), (9)式に示す.

$$E_r = E_{0r} e^{i\phi_r} \quad (8)$$

$$E_s = E_{0s}e^{i\Phi_s} \quad (9)$$

4画像法では参照光の位相を  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  変位させた4枚の画像からプローブ光の位相を求める。プローブ光と位相を  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  変位させた参照光を干渉させたときの光強度をそれぞれ  $I_1, I_2, I_3, I_4$  とすると

$$I_1 = I_r + I_s + 2E_{0s}E_{0r} \cos(\Phi_s - \Phi_r) \quad (10)$$

$$I_2 = I_r + I_s - 2E_{0s}E_{0r} \sin(\Phi_s - \Phi_r) \quad (11)$$

$$I_3 = I_r + I_s - 2E_{0s}E_{0r} \cos(\Phi_s - \Phi_r) \quad (12)$$

$$I_4 = I_r + I_s + 2E_{0s}E_{0r} \sin(\Phi_s - \Phi_r) \quad (13)$$

で表される。ただし、 $I_r, I_s$  は参照光とプローブ光の強度である。この式 (10) ~ (13) を位相差  $\Phi_s$  と  $\Phi_r$  について解くと

$$\Phi_s - \Phi_r = \tan^{-1} \left( \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \right) \quad (14)$$

となり、位相を変化させた4種類の参照光の計測から、プローブ光の位相差を定量的に算出することができる。

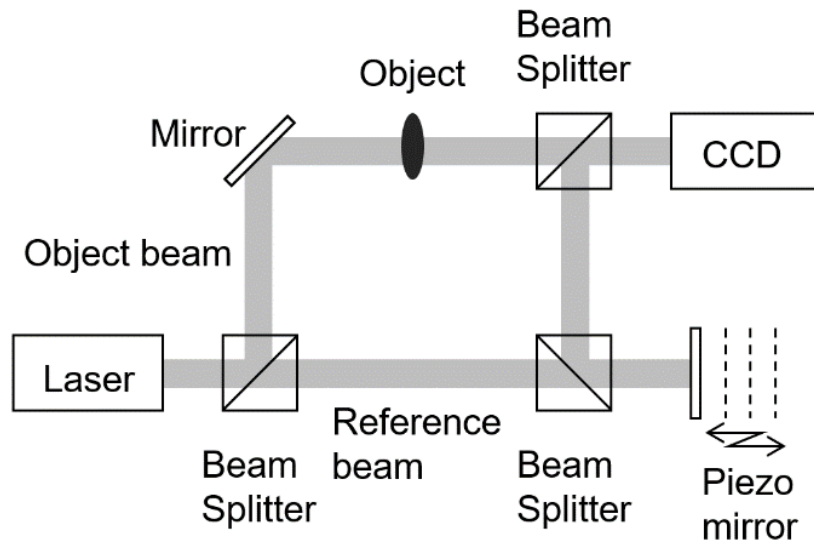
また、同様に式 (10) ~ (13) をプローブ光の強度  $I_s$  について解くと

$$I_s = \frac{(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2}{4I_r} \quad (15)$$

となりプローブ光の強度分布を求めることができる。この変化度合いを計測することで、参照光が計測領域を通過したときのプローブ光の吸収量を算出することができる。

以上のように、位相シフト干渉法を用いることで、計測対象の位相差情報とプローブ光吸収率を同時に定量計測することができる。

一般的な位相シフト干渉法は、参照光の位相を変化させるために、反射ミラーを駆動させることで光路長を変化させ計測を行う[18]。そのため、4枚の位相変化像を撮影するのに時間がかかり、高速に変化する現象の計測ができないことが課題である。



JLMN から許可を得て引用

図 2-6 位相シフト干渉法を用いた可視化装置の模式図

### 2-3-2. 偏光高速度干渉法を用いた高速観察

位相シフト干渉法の課題である高速度な現象を取得できないことを克服するため、カメラの画素ごとに異なる方位の偏光素子をもった偏光板をもった偏光

第2章-偏光高速度干渉法を活用したブルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

カメラを用いて1枚のカメラ像を画素ごとに分解し位相差像を生成することによりワンショットで位相差像を取得する方法、偏光高速度干渉法が考案された[19-26]。位相差像を画素ごとに取得する技術は、ホロウィッツにより最初に報告された[25,26]。その後ミラーらによって偏光カメラにより位相シフト干渉法に適用した[19,20]。また、石川らは40kHzの振動源によって発せられる空気中の超音波の可視化に成功した[27]。偏光高速度干渉法を用いれば、レーザ加工中に発生したブルームの屈折率、吸収率の推移を高速に捉えることができると考え、本手法を用いた可視化装置を具現化することとした。本節では、偏光高速度干渉法の原理について説明する。

図2-7に偏光高速度干渉法の模式図を示す。本手法は、計測対象を通過させるプローブ光と基準光である参照光に4方位の偏光成分を合波させた光を用い、4方位の偏光成分それぞれにプローブ光と参照光の位相シフト量を持たせ撮像することで、4枚の干渉画像を1枚の画像で取得する方法である。

まず、プローブレザ光学系の原理を説明する。参照光とプローブ光を90°方向をx、0°方向をyとしたジョーンズベクトルで表すと

$$E_r = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{0r} e^{i\phi_r} \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$E_s = \begin{bmatrix} E_{0s} e^{i\phi_s} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

で表される。45°傾けた1/4波長板を通過した後の参照光とプローブ光は、

$$E_r = \begin{bmatrix} E_{0r} e^{i(\phi_r - \frac{\pi}{4})} \\ E_{0r} e^{i(\phi_r + \frac{\pi}{4})} \end{bmatrix} \quad (18)$$



$$E_s = \begin{bmatrix} E_{0s} e^{i(\Phi_s + \frac{\pi}{4})} \\ E_{0s} e^{i(\Phi_s - \frac{\pi}{4})} \end{bmatrix} \quad (19)$$

となり、それぞれ右回りと左回りの円偏光になる。つまり、参照光とプローブ光の元の位相差に対して  $0^\circ$  方向の直線偏光成分では  $3\pi/2$ ,  $90^\circ$  方向の直線偏光成分では  $\pi/2$  の位相差が加わっていることがわかる。

また、 $45^\circ$  方向を x,  $135^\circ$  方向を y とし基底を  $45^\circ$  回転すると

$$E_r = \begin{bmatrix} E_{0r} e^{i\Phi_r} \\ E_{0r} e^{i(\Phi_r + \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$E_s = \begin{bmatrix} E_{0r} e^{i\Phi_s} \\ E_{0r} e^{i(\Phi_s - \frac{\pi}{2})} \end{bmatrix} \quad (21)$$

と表される。これより、参照光とプローブ光の位相差は  $45^\circ$  方向の直線偏光成分で 0,  $135^\circ$  方向の直線偏光成分では  $\pi$  加わっていることがわかる。(図 2-8)

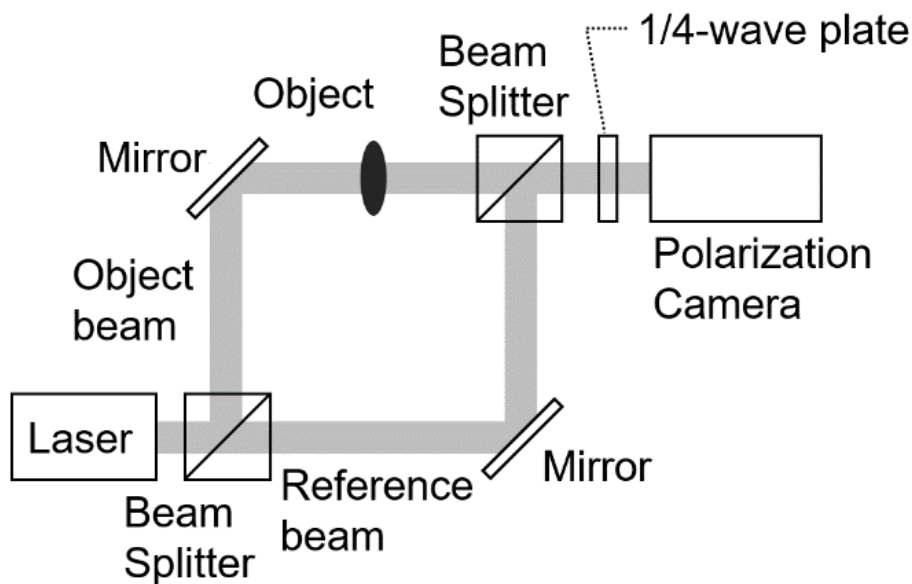
以上のことからプローブ光の位相差  $\Phi_s - \Phi_r$  は、4 方向の直線偏光子をそれぞれ透過した  $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$  の位相差の強度情報  $I(0), I(\pi/2), I(\pi), I(3\pi/2)$  から

$$\Phi_s - \Phi_r = \tan^{-1} \left( \frac{I(3\pi/2) - I(\pi/2)}{I(0) - I(\pi)} \right)$$

によって求めることができる。

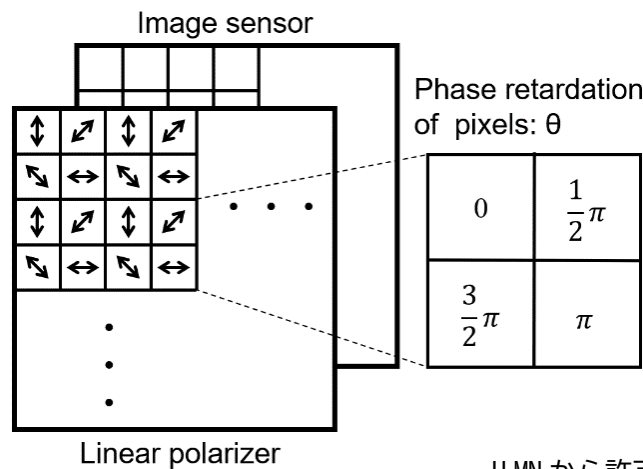
第2章-偏光高速干渉法を活用したブルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

次に検出系の特徴を説明する。検出系には異なる4つの位相差の強度情報を同時に計測するために、偏光高速カメラを用いる。図2-8に偏光高速カメラの撮像面の模式図を示す。撮像素子ごとに、 $0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$ の4種類の直線偏光子が設置されており、4種類の偏光像を同時に得ることができる。これにより一回の撮影で位相計算に必要な画像が得られることができ、高速度に変化する位相計測が可能となる。



JLMN から許可を得て引用

図 2-7 偏光高速干渉法を用いた可視化装置の模式図



JLMN から許可を得て引用

図 2-8 偏光高速カメラのセンサ模式図

### 2-3-3. 偏光高速度干渉法を活用したプルーム可視化装置

偏光高速度干渉法を活用したレーザ加工中のプルーム可視化装置について説明する。開発した可視化装置の模式図と実機の写真を図 2-9 に示す。実験装置は、オレンジで示した光路を持つプローブレザ光学系と検出系、赤で示した光路を持つ加工用レーザ光学系で構成される。

プローブレザ光学系では、まず偏光ビームスプリッタによって直交する直線偏光に光波を分ける。一方のプローブ光はプルーム内を伝搬させ、他方の迂回させた参照光と偏光ビームスプリッタにより合波させる。1/4 $\lambda$ 板を通過させた後の2つの光はそれぞれ時計回りと反時計回りの円偏光状態に変化したのちに偏光高速度カメラによって撮像される。プローブレザ光学系には偏光高速度カメラに内蔵される偏光素子の特性から532nmの波長の光を用いた。

検出系には、偏光高速度カメラとしてフォトロン製偏光ハイスピードカメラCRISTAを使用した[20]。カメラの最大画素数は1024 $\times$ 1024である。視野はプルームの全域を可視化できるよう、直径1.5mmの領域を可視化できるよう拡大レンズを設置した。この時カメラ1画素当たりの大きさは1.25 $\mu$ mとなる。

加工用レーザの照射から次のレーザ照射までの数十 $\mu$ s間のプルーム挙動の時間変化を可視化するためには、高速度カメラのフレームレートで対応することは困難である。そのため、加工用レーザが発振器から照射された時に発振器から出射信号としてカメラに電気信号を発信し、発振器から加工点までに光が進む時間を考慮し、出射信号に所定の遅延時間を設けて偏光高速度カメラの撮像ができる構造とした。この機構を利用し遅延時間を変化させ同条件の照射実験を繰り返すことにより、レーザ照射直後から次のレーザ照射までの間のプルームの挙動を撮像した。

第2章-偏光高速干渉法を活用したブルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

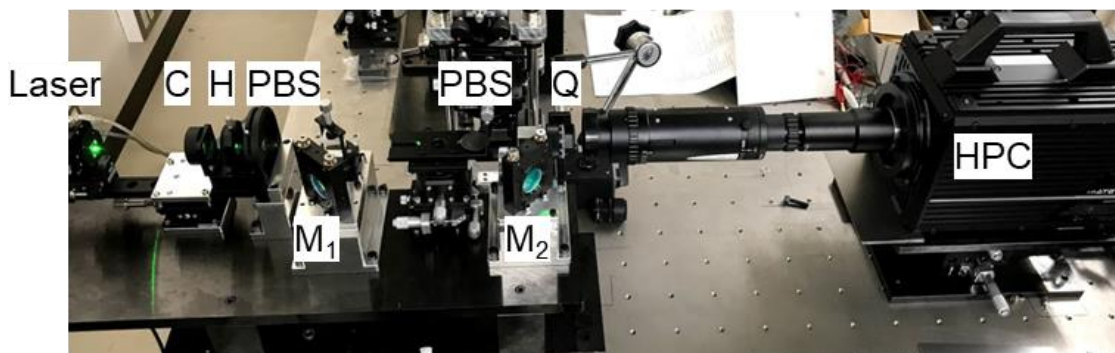
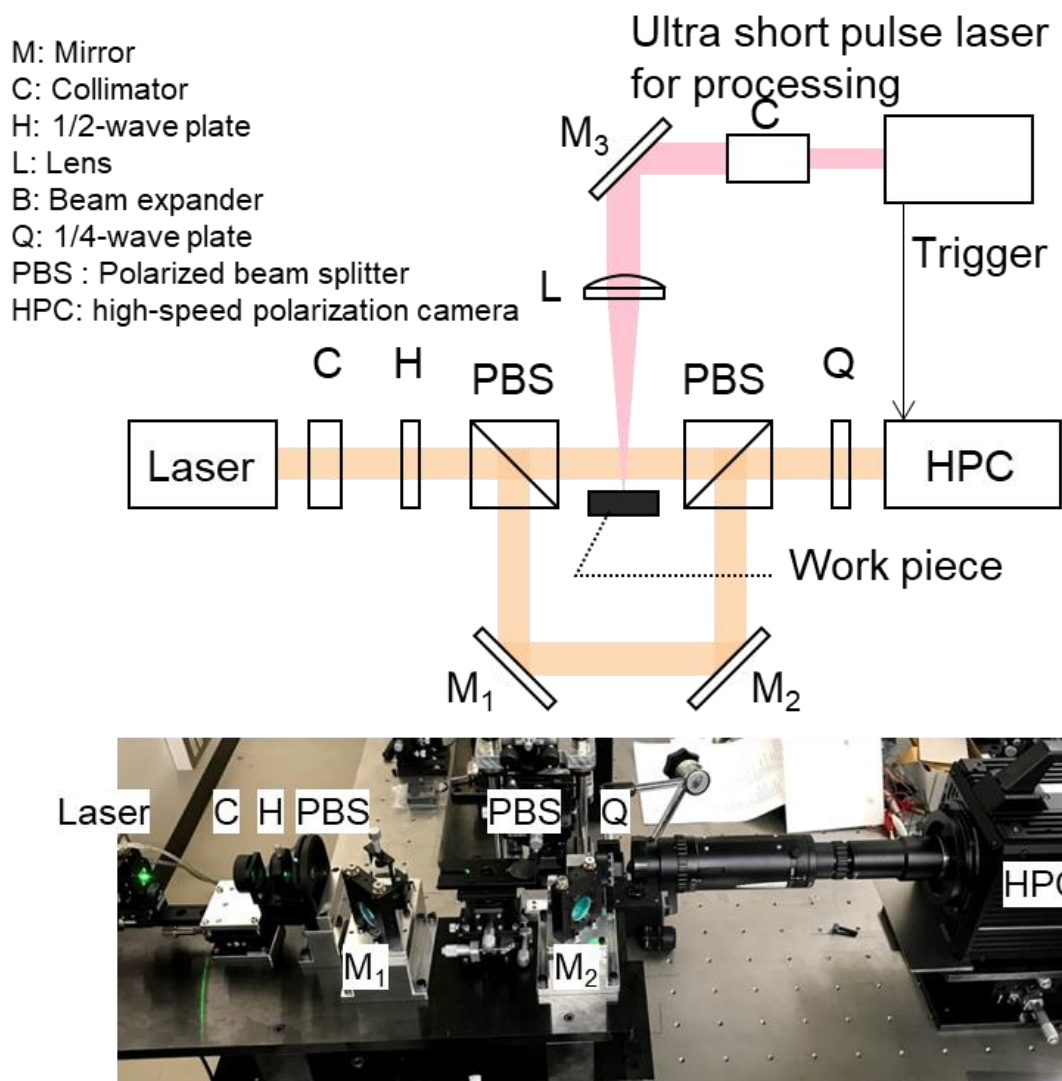


図 2-9 実験装置

## 2-4. プルーム挙動の定量可視化と加工への影響

今回新たに構築した偏光高速度干渉法を活用したプルーム可視化装置を用い、レーザー加工中のプルームの挙動を可視化し、加工への阻害量を分析した。まずレーザー照射によるプルーム形状や挙動を把握するために単発レーザー照射時のプルーム挙動の可視化を行った。次に実加工を模擬し高繰返し条件、実製品加工を模擬した狭隘領域へのレーザー照射時の可視化を行った。

### 2-4-1. 単発レーザー照射時におけるプルーム可視化結果

レーザー照射後のプルームの挙動を可視化するために、金属板にレーザー光を照射しその時のプルーム挙動を可視化装置によって撮像した。素材は SUS430 (板厚 0.5mm, 表面粗度 Rz3  $\mu\text{m}$ ) を用い、加工用のレーザーは波長 1030 nm, パルス幅 10 ps のもので、180  $\mu\text{J}$  で 20  $\mu\text{s}$  間隔でレーザー光を金属板に  $\Phi 25 \mu\text{m}$  に集光させ照射した。この時のプルームの挙動を 5  $\mu\text{s}$  間隔で可視化した。また、従来法との比較のため、高速度カメラで自発光像を同条件で撮影した。

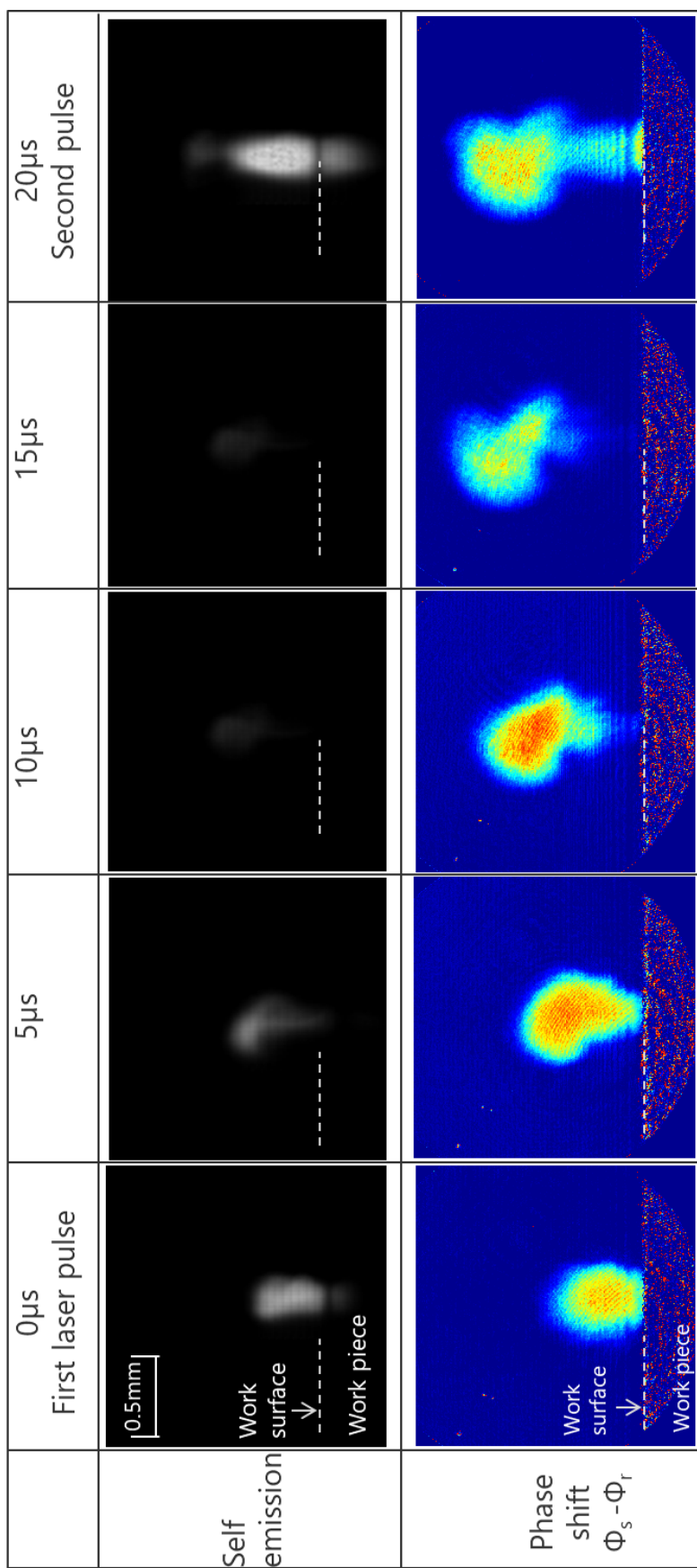
実験結果を図 2-10 に示す。実験結果は従来法によるプラズマ自発光像と今回新たに開発した偏光高速度干渉法を用いた可視化装置による屈折率の変化度合を示す位相シフト像を示している。

まず従来法であるプラズマ自発光像撮像結果について説明する。レーザー照射直後である 0  $\mu\text{s}$  でプラズマが発生した後、5  $\mu\text{s}$  後には光量が減りながら上方に推移していることが分かる。プラズマが上方に移動する理由は、プルームが発生した際ワークから反張力が発生しているためと推定される。プラズマは時間の経過とともに温度が低下していくため光量が減じ、10  $\mu\text{s}$  後と 15  $\mu\text{s}$  後には自発光はほとんど観察できない。そして、1 回目のレーザー照射から 20  $\mu\text{s}$  後に 2 回目

## 第2章-偏光高速度干渉法を活用したプルーム挙動定量可視化技術の開発と 加工能率向上の指針明確化-

のレーザが照射されるが、プラズマの発光範囲は1回目のレーザ照射時よりも広範囲になっている。1回目と2回目のレーザ照射によるプラズマ発光量の比較を図2-11に示す。2回目のレーザ照射時の方が1回目に比べ発光量が多い理由は、1回目のレーザ照射により発生したプルームが2回目のレーザ照射時にも残存しており、そのプルームにレーザが照射され再びプラズマになったためと推定される。しかし2回目のレーザ照射直前のプルームの様子が分からないため、その評価は困難である。

次に本研究で具現化した偏光高速度干渉法を用いたプルーム可視化装置により可視化した位相差像について説明する。1回目のレーザ照射直後のプラズマ自発光像と位相差像を比較したものを図2-12に示す。この図から位相差像は自発光像よりも広い範囲で信号が得られていることが分かる。これは自発光領域周辺に発光強度の弱い低温のプラズマや発光を伴わない金属蒸気が存在し、それを捉えているためと考えられる。また位相差像の中心部も位相差情報が得られ、中心部のほど位相差が大きい傾向がみられた。1回目にレーザが照射されてから10  $\mu\text{s}$  後と15  $\mu\text{s}$  後に着目すると、自発光像においては観察できなかったプルームが、位相差像では明瞭に挙動を観察することができる。この時、プルームはワークから離脱し加工点上方に漂っている。そして20  $\mu\text{s}$  後に2回目のレーザが照射された時には1回目のレーザ照射によるプルームが浮遊している下に加工点から2回目のレーザによるプルームが噴出していることが確認できる(図2-13)。以上のように、偏光高速度干渉法を用いたプルーム可視化装置を用いることにより、これまで捉えられなかったプルームの挙動を可視化することができ、プルームがレーザ照射と干渉する様子を捉えることに成功した。



JLIM から許可を得て引用

図 2-10 実験結果

第2章-偏光高速度干渉法を活用したブルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

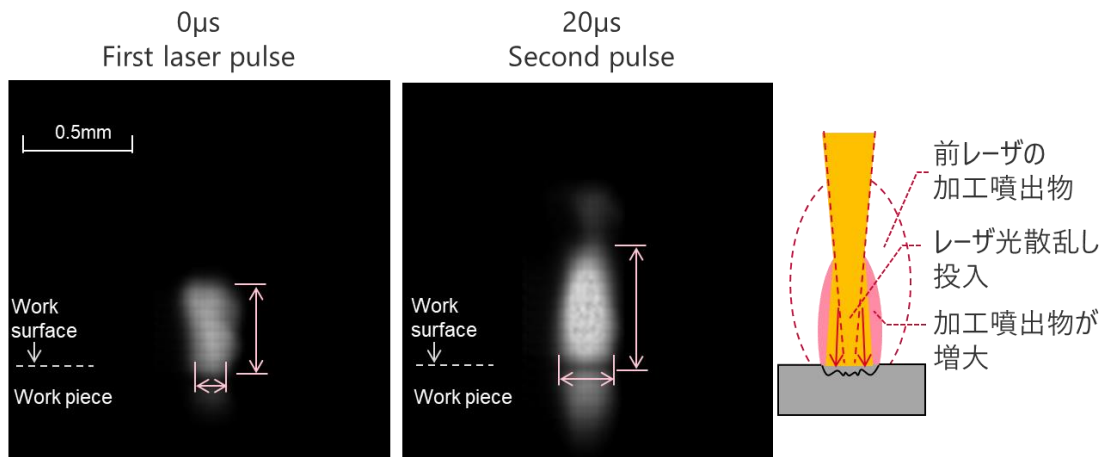


図 2-11 1回目と2回目のレーザー照射時のプラズマ発光量の比較

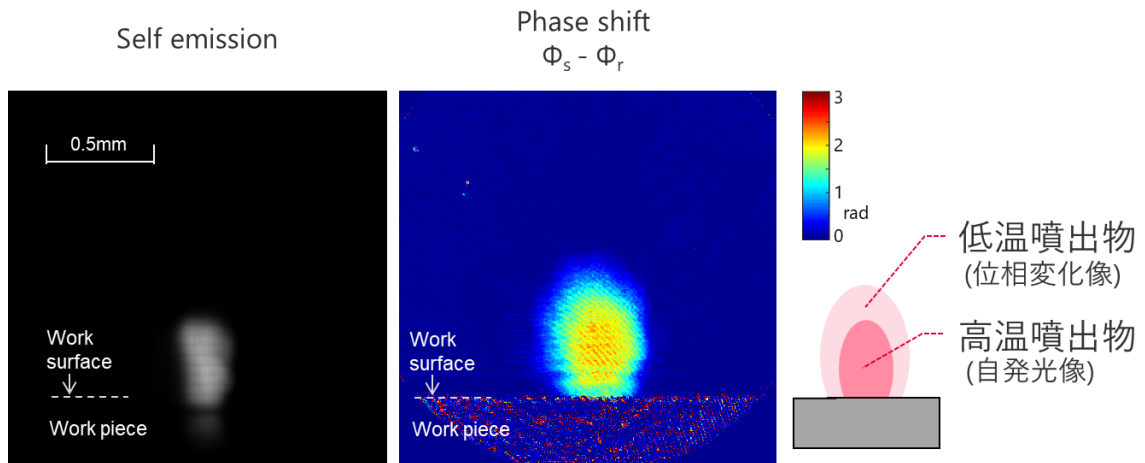


図 2-12 1回目のレーザー照射時における自発光像と位相差像の比較

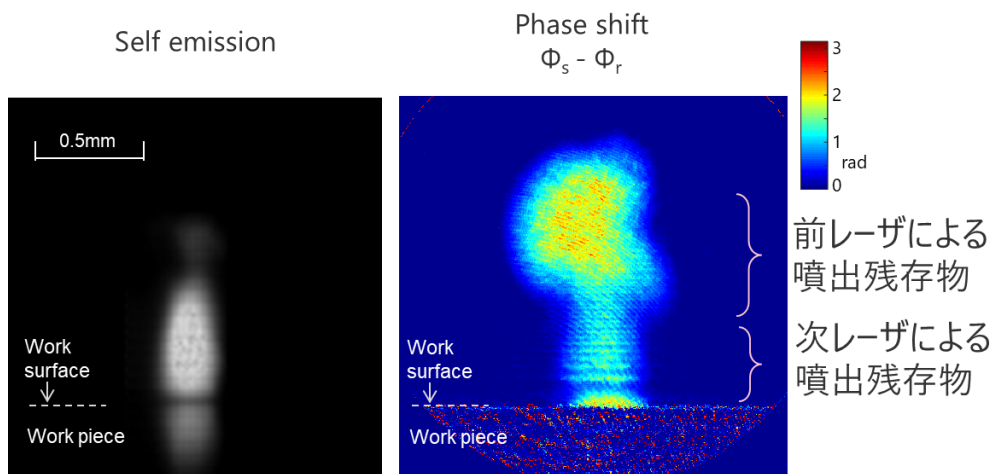


図 2-13 2回目のレーザー照射時における自発光像と位相差像の比較



第2章-偏光高速度干渉法を活用したプルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

以上の位相差像撮像結果からプルームの屈折率を導出する。内部の情報を詳しく分析する方法としてアーベル変換等の処理方法が挙げられるが、プルームの形状は軸対象でない複雑な形状であり処理に複雑さが伴うため、今回はプルームの領域における位相差を平均化することにより平均屈折率を求めた。1回目のレーザーが照射された直後の位相差像の断面の位相差分布を図2-14に示す。噴出物の平均屈折率  $n$  は以下の式で導くことができる。

$$n = n_0 + \frac{h \cdot \lambda}{2\pi \cdot d} \quad (23)$$

ここで、 $n_0$  は空気屈折率、 $\lambda$  はプローブ光の波長である。この式を基に時間に対するプルームの屈折率の推移を分析した結果を図2-15に示す。この結果から、屈折率はレーザー照射から  $5 \mu\text{s}$  までは増加しそれ以降減少していくことがわかる。これはプルームが広がりながら噴出していき濃度が薄くなっているためと考えられる。以上のように、レーザー加工中におけるプルームの屈折率の推移を明らかにすることができた。

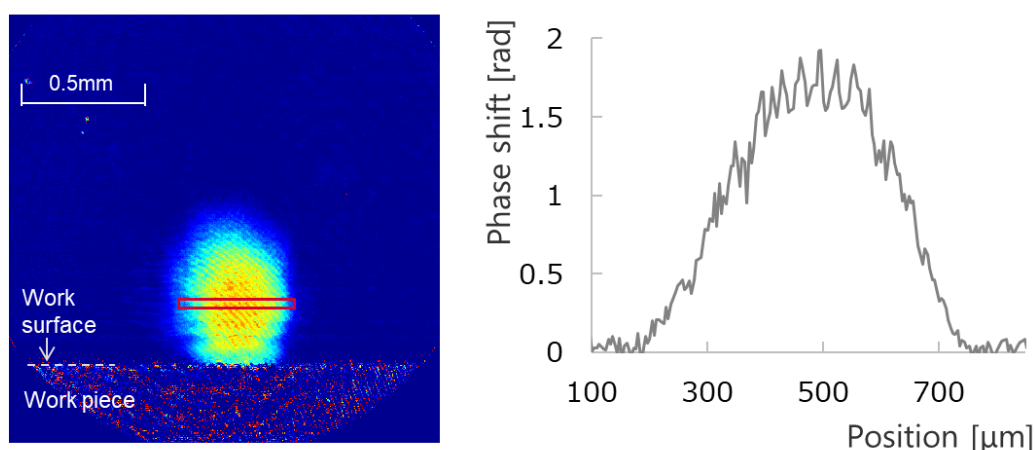


図 2-14 1回目のレーザー照射時におけるプルームの位相差分布分析結果

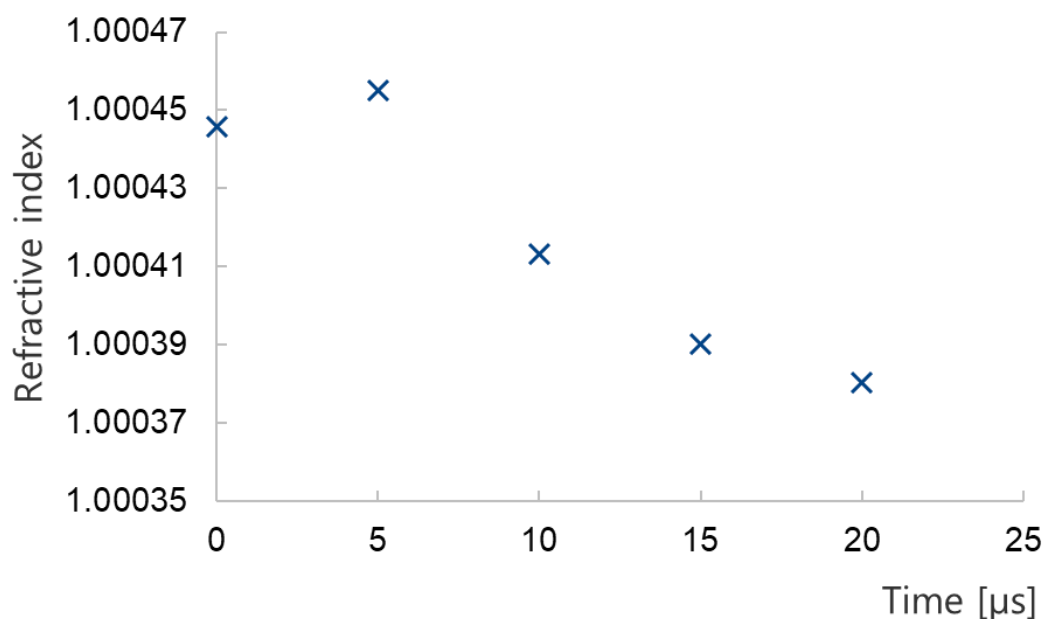


図 2-15 プルームの屈折率推移評価結果

次に透過像について説明する．式(15)に基づきカメラ像を透過像に変換した．1回目のレーザー照射直後の位相差像と透過像の比較を図2-16に示す．透過像は白いほどプローブ光の透過量が多く，黒いほどプローブ光の透過量が少ないことを示す．透過像における黒い領域、すなわちプローブの透過量が少ない領域は位相差像と同じ範囲であることが分かる．ただし，透過像の中心部に注目すると，中心部は周辺部に比べ白く，透過量が多いことを示す結果となった．プルームの中心部と上部の透過率を比較した結果を図2-17に示す．プルームの中心部はより高温のプルームであると想定されること，さらに周辺部に比べプルームの進行方向に多くプルームが存在することから，プルームの中心部のプローブ光の透過率は周辺部より低いと考えられ，推定と異なる結果となった．この原因は，プルームの周辺部は屈折率が外側に至るに従い低くなる分布になっており，この屈折率分布によりプルームがレンズと同様の効果を示し，プローブ光が透過した際中心に曲げられてしまったためと考えられる．そこでプローブ光が中心

第2章-偏光高速度干渉法を活用したプルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

に曲げられた作用を考慮し、プルーム全域の透過量平均を基に吸収率を評価することとした。プルーム全域における透過光量の平均値をプルーム平均透過量  $I_1$  とする。次にプルーム外の領域の強度  $I_0$  とし、プルームの外径を  $d$  とすると、プルームの吸収係数  $\mu_a$  は以下の式により求めることができる。

$$\mu_a = -\frac{1}{d} \ln \frac{I_1}{I_0} \quad (24)$$

この式を基に、プルームの吸収係数の推移を分析したものを図 2-18 に示す。この結果から屈折率の推移と同じく吸収係数についてもパルス照射から 5  $\mu\text{s}$  後に吸収係数が大きくなりその後減少していくことが分かった。

以上のように、偏光高速度干渉法を用いた可視化装置によりレーザ加工時のプルームにおける屈折率と吸収係数の推移を求めることができた。

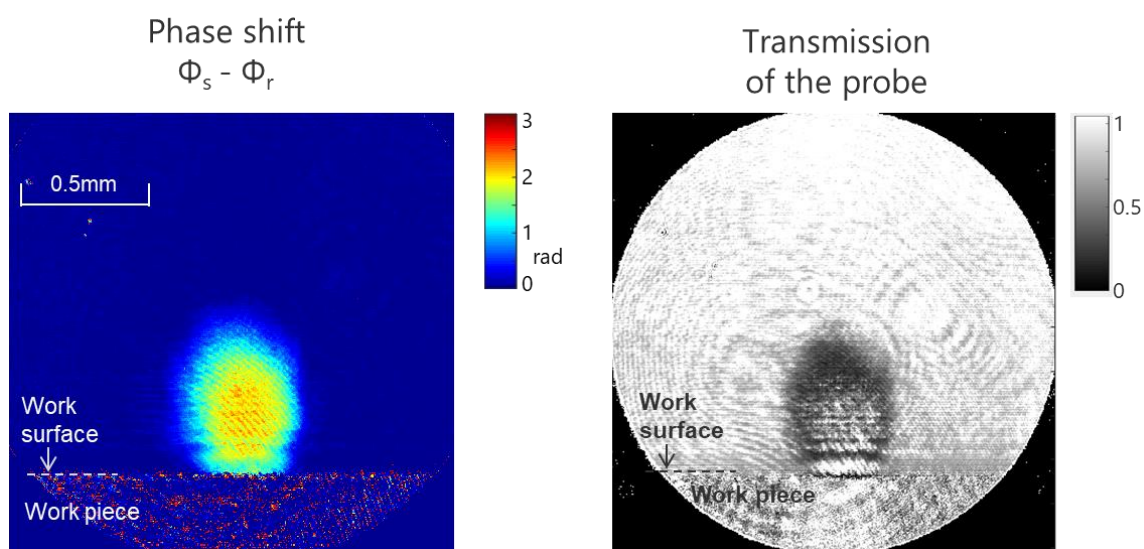


図 2-16 プルームの位相差像と透過像の比較

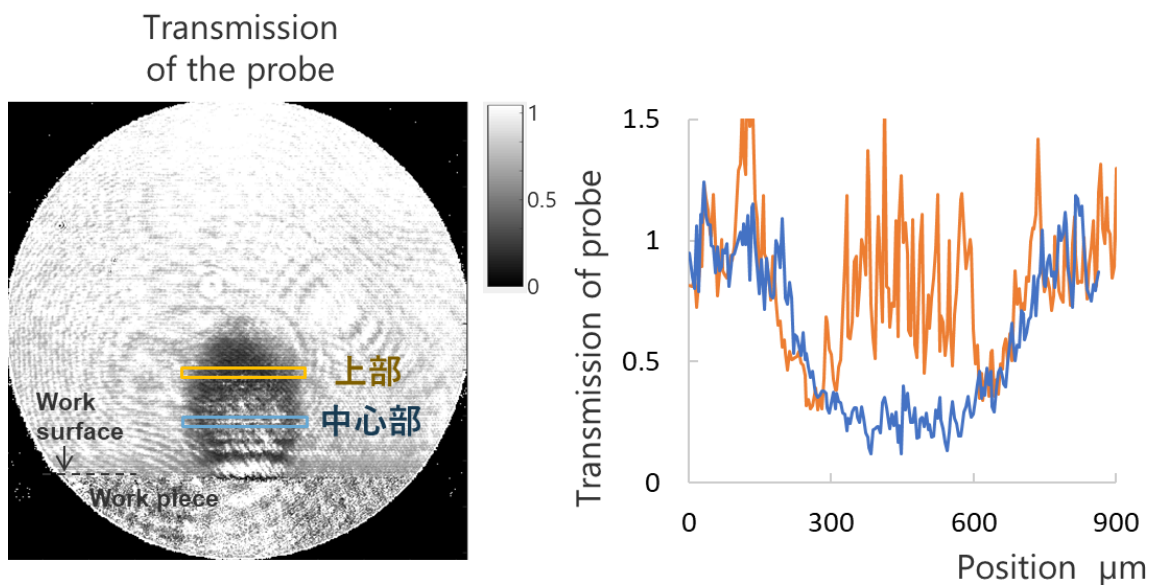


図 2-17 ブルームの中心部と上部の透過量分布の比較

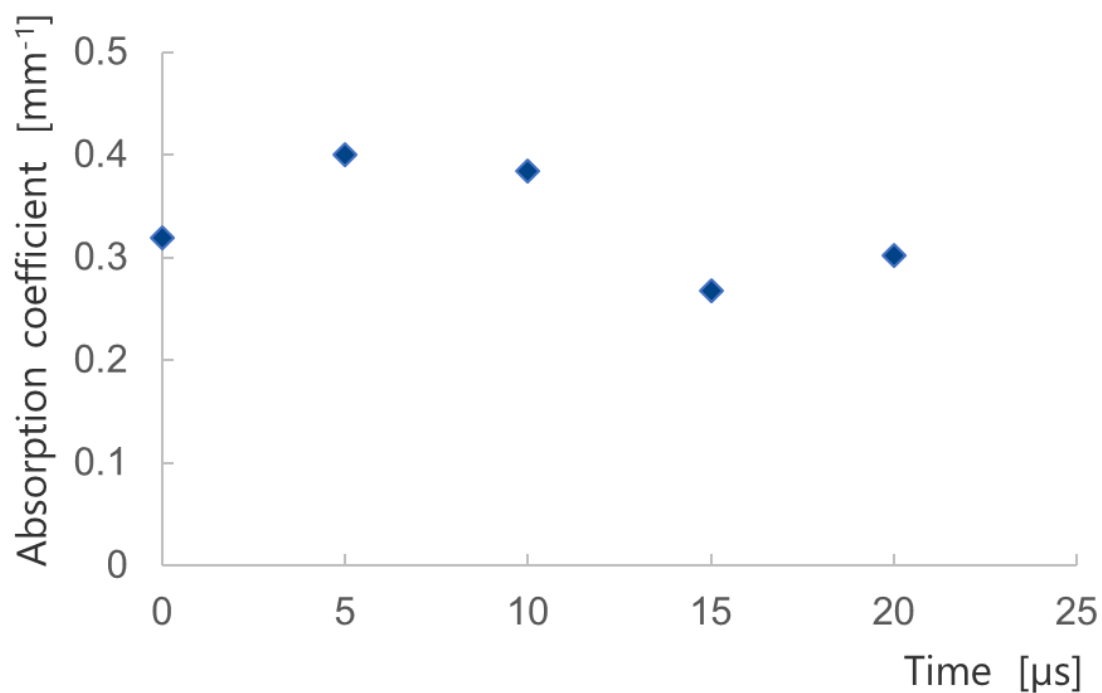


図 2-18 ブルームの中心部と上部の透過量分布の比較

## 2-4-2. 高繰返し垂直レーザー照射時におけるプルーム可視化結果

次に、実製品においてレーザーを操作しながら加工を行う事を模擬し、高繰返しで垂直にレーザーを照射したときのプルームの可視化及び分析を行った。実製品加工ではレーザーを走査しながら溝や孔形状の加工を行う。レーザーの走査にはレンズを回転させることにより円弧軌道を付与するビームローテータや、サーボモータによりミラーを往復運動させ走査軌跡を制御するガルバノスキャナが用いられる。いずれの手段であっても走査速度には限界があるため、レーザーは照射ごとに前のレーザー照射領域と重なり合いながら加工が進展する。集光径 $\Phi 25\ \mu\text{m}$ 、繰返し周波数 50 kHz で百  $\mu\text{m}$  オーダの微細溝や孔を加工する時、走査速度の制約からパルスごとに  $2\ \mu\text{m}$  ずつ照射位置がずれながら加工が進行するため、レーザーは 10 回以上重なりながら加工が進展することとなる。よって実製品加工時のプルームの加工阻害を明らかにするために、レーザーの照射が 10 回照射されたときのプルームの挙動を可視化した。対象の素材とレーザーの条件は、前節と同じく素材は SUS430、レーザー条件は波長 1030 nm、パルス幅 10 ps、1 パルス当たりのエネルギーは 180  $\mu\text{J}$ 、繰返し周波数 50 kHz、集光径  $\Phi 25\ \mu\text{m}$  である。

可視化した位相差像を図 2-19 に示す。この結果から、レーザーの照射回数を増すと、プルームは水平方向にはほとんど広がらず垂直方向に噴出していくことが分かる。この時のプルームの噴出方向の端部の位置を画像ごとに取得し、噴出速度を分析した結果を図 2-20 に示す。プルームは 77.5 m/s で噴出しており、10 回レーザーを照射した時でも速度が大きく変化することなく噴出し続けることが分かった。

第2章-偏光高速干渉法を活用したプルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

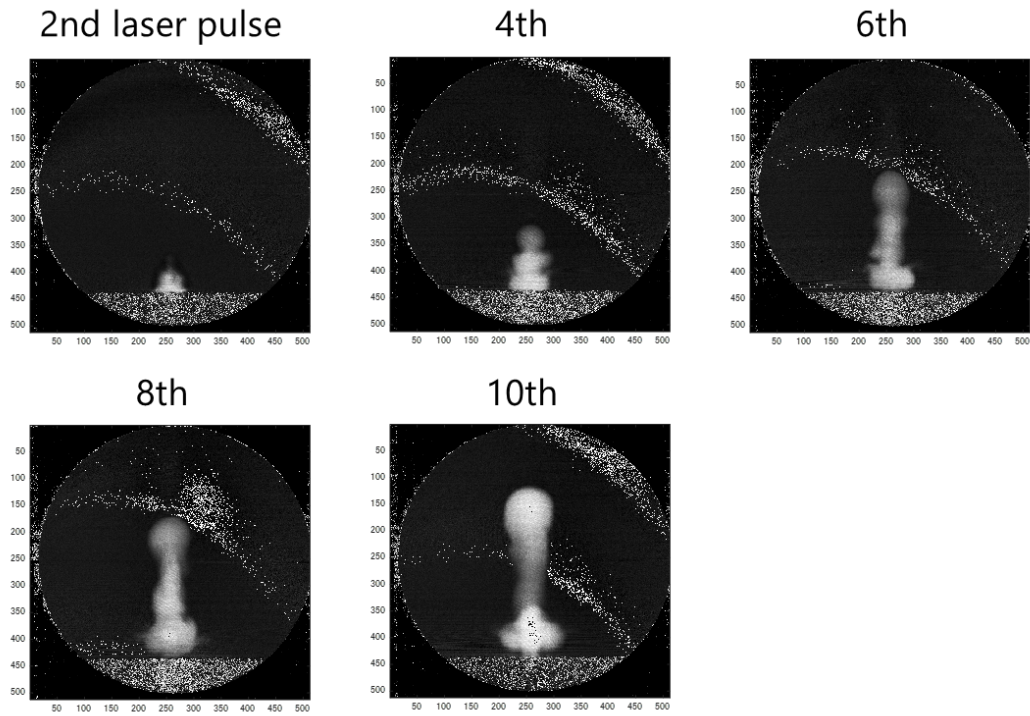


図 2-19 高繰返しレーザ照射時の位相差像

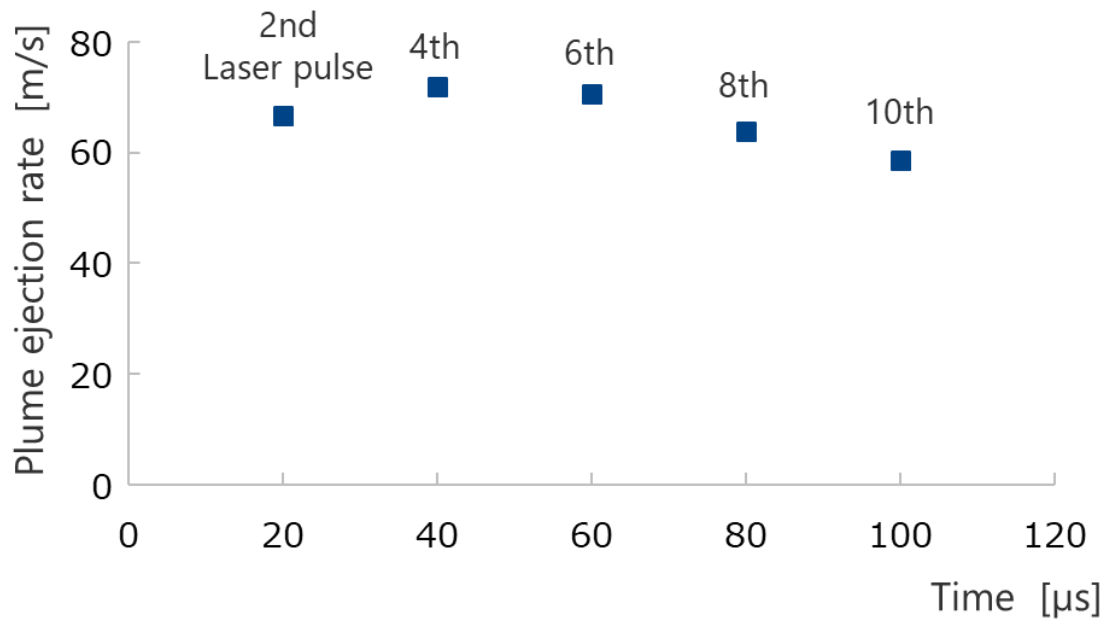


図 2-20 プルームの噴出速度分析結果

第2章-偏光高速度干渉法を活用したプルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

次に、レーザを連続的に照射した時に発生するプルームのレーザの投入阻害について分析した。まず各レーザ照射回数のレーザの透過像から、前節と同様の方法により吸収係数を導出する。そして、レーザが照射されたときのレーザが通過する距離をかけることによりプルームのレーザ吸収量を求め、レーザの投入エネルギーを100%としたときのワークにおける加工点まで到達したエネルギーの割合を計算により求めた。分析結果を図2-21に示す。この結果から、10回レーザを照射した時、レーザのワークへの透過率は76%となり、プルームに34%吸収されることが分かった。以上の結果から、実製品加工を模擬した場合、プルームはレーザの投入を34%阻害することが分かった。

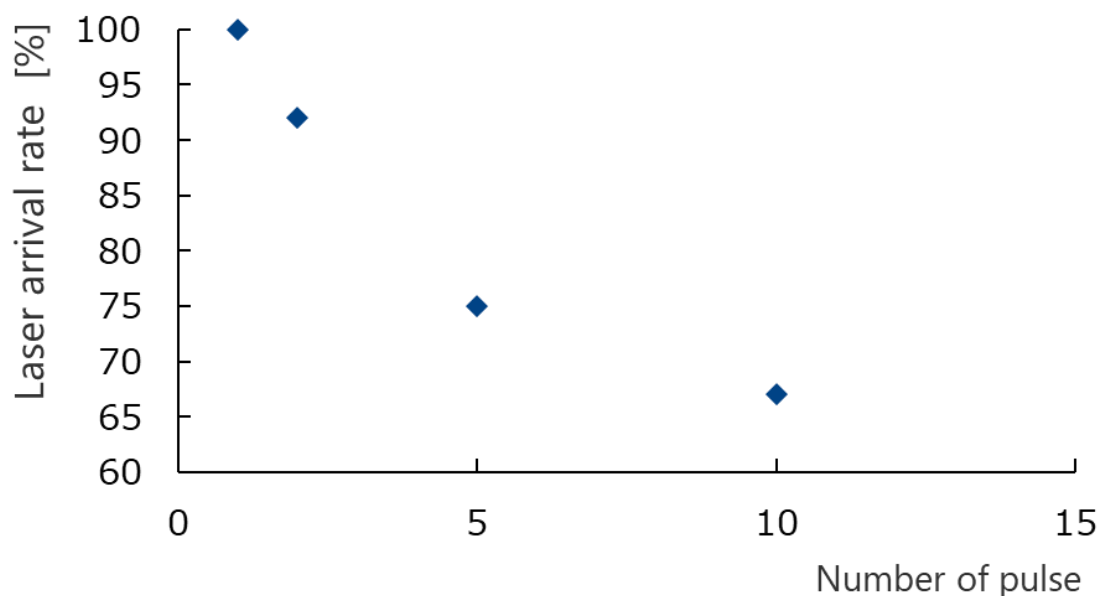


図 2-21 高繰返しレーザ照射時のワークへのレーザ到達率

### 2-4-3. 狭隘領域へのレーザ照射時におけるブルーム可視化結果

最後に、実製品における形状加工を模擬し狭隘領域にレーザを照射したときのブルームの可視化及び分析を行った。レーザ加工を用いた形状加工は孔や溝など様々であるが、大きさはおよそ百  $\mu\text{m}$  程度と小さい。また加工が進むにつれ加工点はワークの内部になっていくため、加工により発生するブルームは、狭隘領域にこもり滞留するため、開空間における加工に比べレーザの投入障害が大きくなると推定される。この推定を確かめるため、狭隘空間にレーザを照射したときのブルームを可視化しブルームの形状や屈折率を求め、加工障害について開空間と比較した。

対象形状とレーザ照射領域の模式図を図 2-22 に示す。対象形状は溝形状とし、溝幅 0.5 mm、深さ 1 mm の加工を模擬し、この側面にレーザを照射したときのブルームの挙動を可視化した。対象の素材とレーザの条件は、素材は SUS430、レーザ条件は波長 1030 nm、パルス幅 10 ps、1 パルス当たりのエネルギーは 180  $\mu\text{J}$ 、繰り返し周波数 50 kHz、集光径  $\Phi 35 \mu\text{m}$  である。この条件でレーザを 2 回照射したときのブルームの挙動を可視化した。

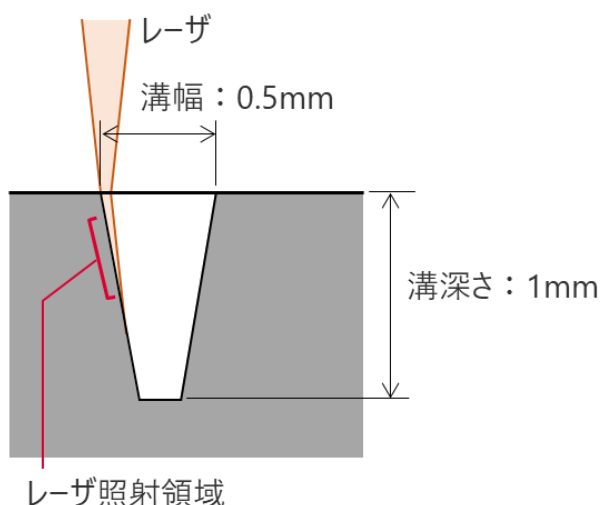
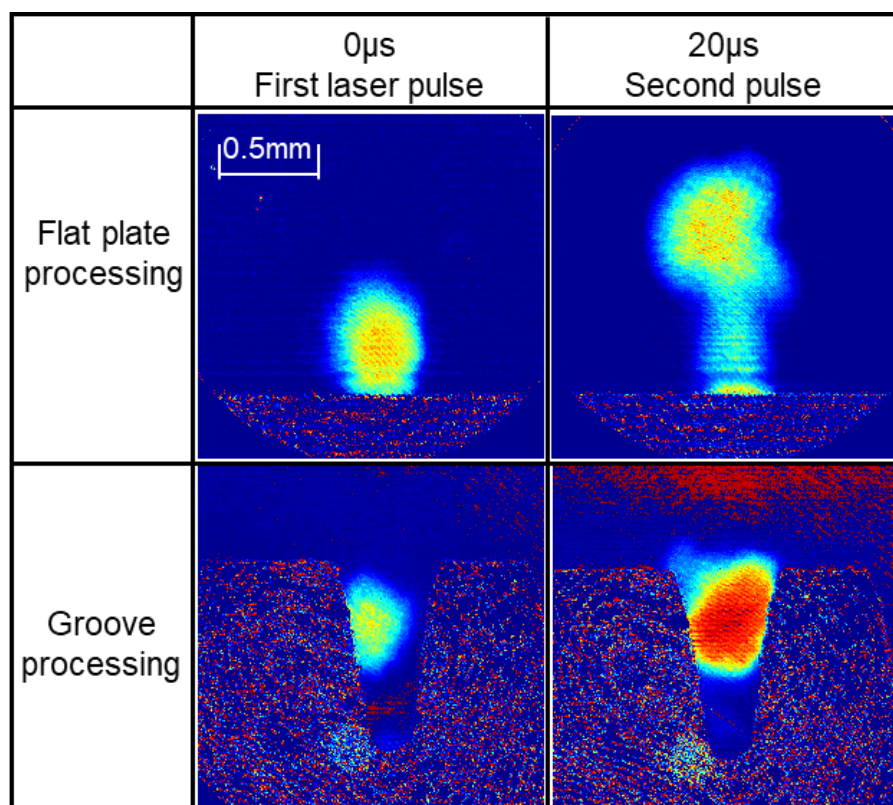


図 2-22 実製品加工を模擬したワーク形状とレーザ照射領域の模式図



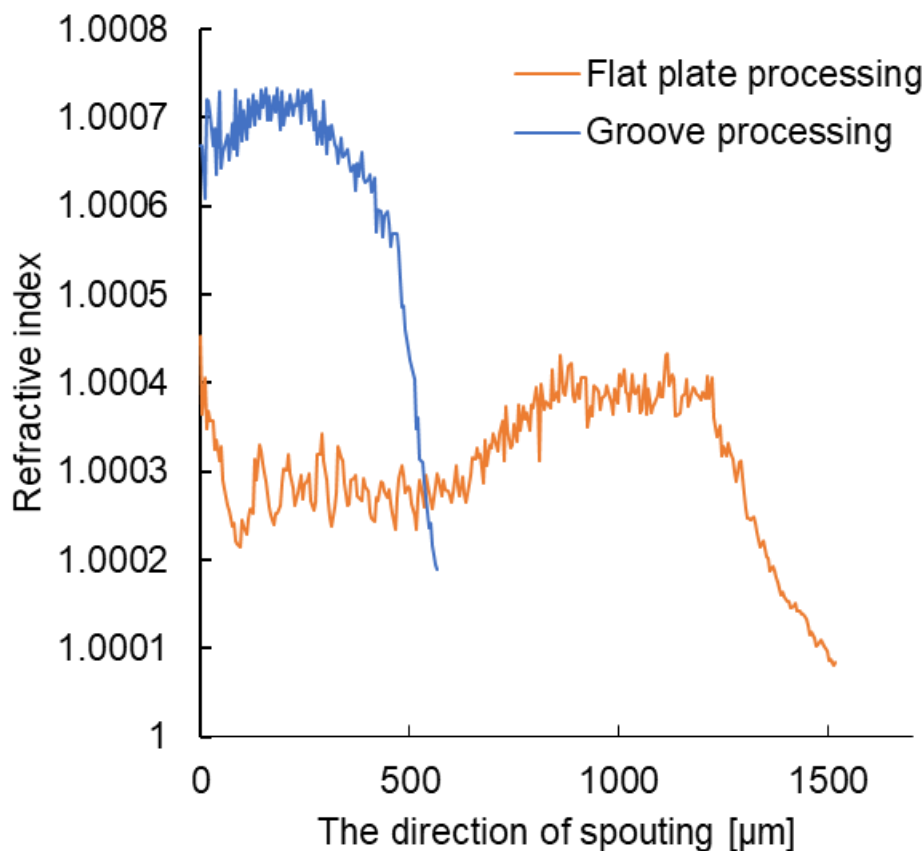
第2章-偏光高速干渉法を活用したプルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

プルームの可視化結果と垂直レーザー照射時との比較結果を図 2-23 に示す。レーザー照射により発生したプルームは加工点である溝の斜面から直角方向に噴出している様子が分かった。この理由は、レーザー照射により除去された物質が昇華した際にワークから反張力を受けて噴出するためである。2 回目のレーザーが照射されたときの位相差像を見ると、溝の対向壁にプルームがぶつかっている様子が確認できる。このことから狭隘空間ではプルームは噴出を遮られることがわかった。垂直レーザー照射時と溝加工時の噴出方向の屈折率の推移を分析した結果を図 2-24 に示す。垂直レーザー照射時には、プルームは 1.5 mm まで噴出しているのに対し、溝加工時には 0.58 mm まで噴出したところで対向壁に遮られていることが分かる。このため、溝加工時のプルームの屈折率は、垂直レーザー照射時に比べ 1.8 倍高いことが分かった。



JLMN から許可を得て引用

図 2-23 溝加工時のプルーム可視化結果及び垂直レーザー照射時との比較



JLMN から許可を得て引用

図 2-24 溝加工時と垂直レーザー照射時の屈折率推移分析結果

最後に、開空間における垂直レーザー照射時と溝内部へのレーザー照射時における加工能率の差を実加工によって求めた。実験では30回加工を実施し、平均および最大と最小値を求めた。図2-25に実験結果を示す。図には各条件の平均及び最大と最小値をプロットした。溝加工時の結果は、垂直レーザー照射時に比べ加工能率が低下しばらつきが大きくなることが分かった。この理由は、溝を加工している時の方が、開空間における加工と比べブルームが滞留する分屈折率や吸収係数が大きくなり、レーザーの投入障害がより大きくなるためと考えられる。

第2章-偏光高速度干渉法を活用したプルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

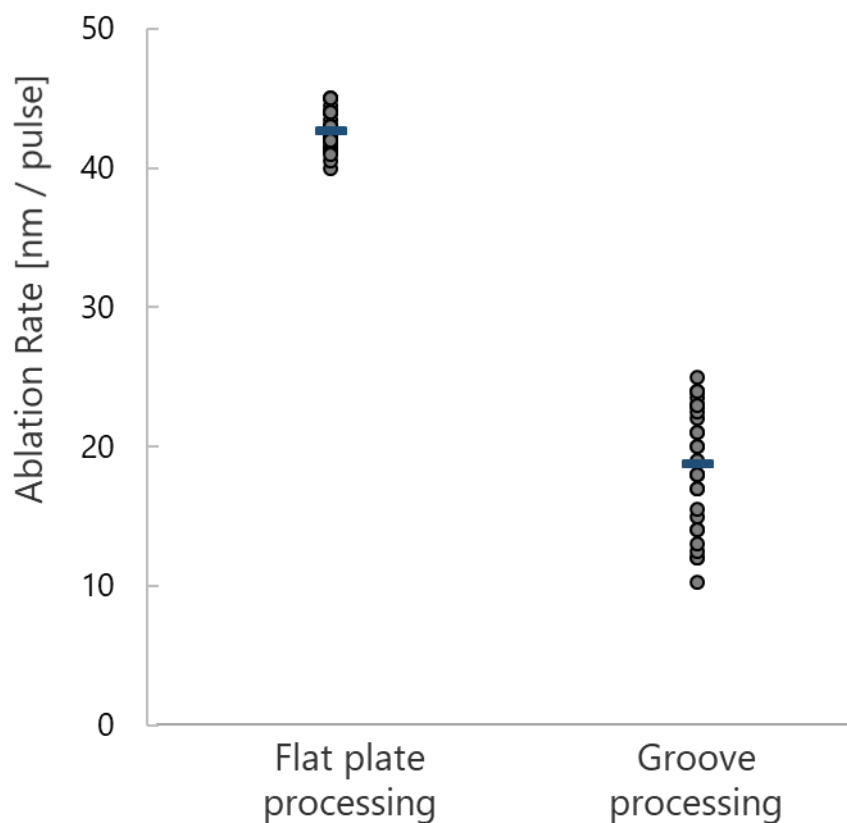


図 2-25 垂直レーザー照射時と溝加工時の加工能率評価結果

以上のことから、溝形状のような実際の製品形状に近い複雑な形状でも本可視化手法を用いることによってプルームを可視化し定量評価することができた。またプルームは照射方向に関係なく加工面に対し直角に噴出することが分かった。狭隘空間となる溝加工の場合、プルームの屈折率の増加は開空間における加工に比べ最大 1.8 倍増加し、プルームは狭い領域に滞留することが分かった。溝のような狭隘領域における加工は開空間における加工よりも加工能率が低下しており、それはプルームの滞留により障害が大きくなっているためであることがわかった。

## 2-5. レーザのブルームとの干渉回避による加工能率向上

前節まででレーザー加工により発生するブルームがレーザーの投入を阻害し、加工能率を低下させることが明らかとなった。特に実製品加工を模擬した場合、ブルームによってレーザーの投入が34%阻害される。これを踏まえ、加工能率を向上させるためには、レーザーとブルームの干渉を回避させレーザーの投入阻害を防ぐことが有効であると考えた。それを立証するために、レーザーとブルームの干渉を回避したときに加工能率が向上するかを検証した。

レーザーとブルームの干渉を回避させる手段の一つとして、レーザーを加工面に対し斜めに入射させることを着想した。ブルームは加工面に対し常に直角方向に噴出することが可視化によって明らかになっているため、これを踏まえ斜めに入射することで、レーザーの照射方向にブルームが噴出しないようにするものである。これまでの可視化結果から、ブルームは加工面から直角方向に幅25度の範囲に噴出する。このため、加工面に対しレーザーを25度以上斜めから照射すればブルームとの干渉を回避し加工能率が向上できる可能性があると考えた。

ワークに対するレーザーの照射角度を変化したときの加工能率評価結果を図2-26に示す。実験におけるレーザー照射条件は、パルス幅10 ps、パルスエネルギー180  $\mu$ J、繰り返し周波数50 kHz、集光径 $\Phi$ 25  $\mu$ mで、30回加工を行った時の除去領域における平均深さ及び最大、最小深さをまとめた。グラフには各条件の平均及び最大と最小値をプロットした。この結果から、照射角度が25度を超えると加工能率が向上し、垂直入射時に比べ加工能率が最大1.28倍向上することが分かった。このことから、レーザーとブルームの干渉を回避することでレーザーの投入阻害を防ぐことができ、加工能率が向上できることが立証された。

一方、レーザーが垂直に入射した時におけるブルームのレーザー吸収によるレーザー透過率は76%であり、この結果からレーザーとブルームの干渉を全て回避できた場合、1.31倍の能率向上が期待できる。しかし今回の結果は、それよりも低い能率向上に留まった。その理由は、ブルームが加工面から直角方向に幅25度

## 第2章-偏光高速度干渉法を活用したプルーム挙動定量可視化技術の開発と 加工能率向上の指針明確化-

以外の範囲にもわずかに噴出し、これがレーザーと干渉したためと考えられる。このことから、レーザーが加工点から連続的に噴出するプルームを全て避けることは困難であることもわかった。

以上の結果から、レーザーの加工能率を向上させるためには、レーザーとプルームの干渉を回避することが有効であり、加工能率向上のための重要な指針を獲得できた。その手段の一つとしてレーザーをワーク表面に対し斜めに照射させることが有効であり、今回の実験条件において加工能率を1.28倍向上できる。また、レーザーとプルームの干渉を回避する手段はこの方法以外にも挙げられる。例えばレーザーの空間分布を制御しプルームの噴出方向を制御する方法や、アシストガスを付与することによりプルームに外力を加える方法、繰返し周波数を変化させレーザーの照射タイミングを変化させる方法などである。これらの方法はこれまでも手段として用いられているものもあるが、これらの方法を最適化するうえでも、本可視化手法を用いてプルーム形状をみながら最適化を行うことで最適値を早期に見出すことができる。

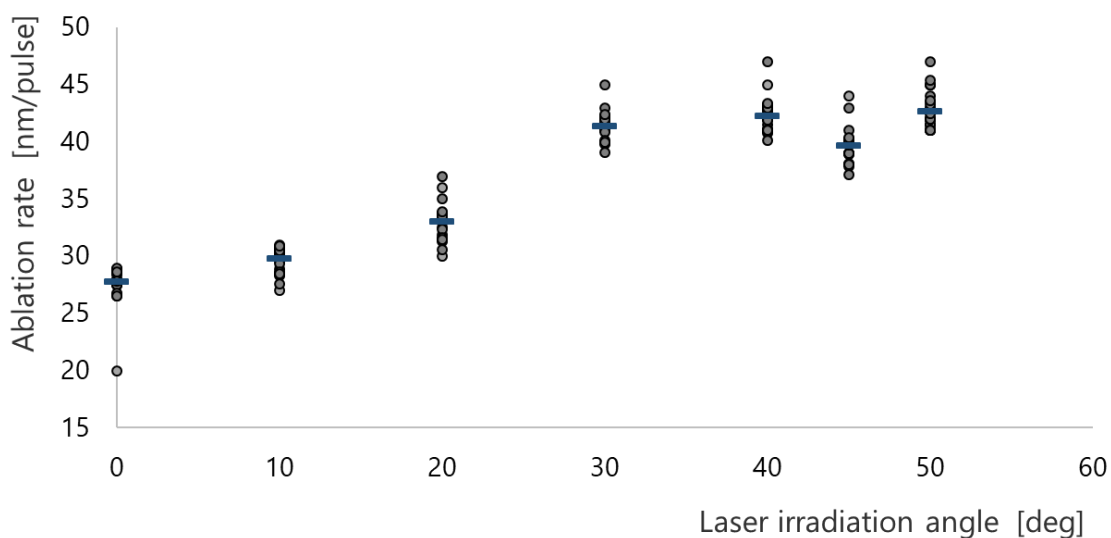


図 2-26 レーザ照射角度変化時の加工能率評価結果

## 2-6. まとめ

レーザー加工時のブルームの加工への影響を評価し加工能率向上の指針を得るために、可視化技術の開発及び、可視化結果に基づいた加工能率向上の指針について検討した。

ブルームを可視化するために、直径 1.5 mm の領域について時間分解能 5  $\mu$ s でブルームの屈折率及び吸収係数を定量的に評価できる装置の構築を目標として掲げた。レーザー加工プロセスに関する従来手法についてシャドウグラフ法、シュリーレン法及びレーザー干渉法が挙げられるが、いずれも定性的な評価に留まるか、定量的な評価手法であっても目標精度に満たないことが課題であった。一方で、屈折率の変化をワンショットで定量的に求める手法として偏光高速度干渉法があり、この手法を活用することで、これまで困難であったレーザー加工中のブルーム挙動の可視化に成功した。

自動車部品に用いられる素材であるステンレス鋼 (SUS430) に対しレーザーを照射し、本研究で具現化した可視化装置を用いてブルームの挙動可視化及び加工能率への影響を分析した。ブルームは加工面から直角方向に噴出し、レーザー照射から 20  $\mu$ s 後も残存し次に照射されるレーザーと干渉することを明らかにした。また、実加工時を想定し連続的にレーザーを照射すると、ブルームは 77.5 m/s の速度で加工面に対し直角方向に噴出し、10 回レーザー照射時ともなるとブルームはレーザーの投入を 34% 阻害することが分かり、ブルームが加工能率低下の大きな要因であることが分かった。また溝加工などの狭隘空間にレーザーを照射した場合、加工面から直角方向に噴出したレーザーが溝対向壁にぶつかることで噴出が遮られ屈折率が高くなり、その分加工能率が低下することも明らかとなった。

これらを踏まえ、加工能率を向上させるための指針としてブルームとレーザー光の干渉を回避することを着想し、その一手段として加工面に対しレーザーを斜入射する方法について効果を検討した。ブルームの可視化によりブルームが加

## 第2章-偏光高速度干渉法を活用したプルーム挙動定量可視化技術の開発と 加工能率向上の指針明確化-

工面から直角方向に幅 25 度の範囲に噴出する方向が明らかとなったため、プルームとの干渉を回避するためには 25 度以上の斜入射が必要であると考え、加工評価を行った。その結果、加工面に対しレーザを 30 度以上傾けて照射することでプルームによる能率低下を防ぐことができることが分かり、加工能率向上の指針としてプルームの可視化像に基づきプルームとの干渉を回避できる方向からレーザ照射を行う指針が有効であることが示された。以上のように、レーザ加工の加工能率向上に関し、これまで定性的な予測に基づく対処療法的な対応に限られていたのに対し、本可視化手法を具現化することで、能率阻害要因をプルームに絞り込むことができ、プロセスに基づいた的確な能率向上の指針を獲得することができた。本研究の価値はここにある。

最後に本研究により得られた知見に基づいた今後の研究の発展性について説明する。本研究で可視化したプルームは、従来法では困難であった発光強度の弱い、もしくは発光を伴わないプルームの可視化に成功したが、本研究では加工阻害の定量評価を目標としていたため、これらの内部の組成、つまり金属蒸気やデブリの割合や振る舞いに関しては明らかにしていない。今回新たに用いた偏光高速度干渉法では位相差像と透過像を同時に取得することができるため、位相差像と透過像を比べることにより金属蒸気やデブリの割合について明らかにすることができる可能性がある。例えば、位相差像の変化が大きく透過像の変化が小さい場合、屈折を起こさせる物質、つまり金属蒸気が多く含まれることになるし、逆に位相差像の変化が小さく透過像の変化が大きい場合、散乱を起こさせる物質、つまりデブリが多く含まれると考えられる。また、本手法を用いればプルームの中心部から境界部の位相差を情報として得られる。この情報を活用すればプルームの外形や屈折や吸収の分布を 3 次元的に表すことができる可能性がある。さらに、本研究では実験対象を自動車部品で多く用いられるステンレス鋼に絞り行ってきたが、素材の違いによりプルームの推移や加工への影響が異なることが想定される。そのため、本可視化技術を用いれば様々な加工の理解も深

第2章-偏光高速度干渉法を活用したブルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

まることが期待できる。本可視化技術を広めレーザー加工技術の更なる発展につ  
なげていきたい。



## 第2章の参考文献

- [1] 流れの可視化学会【編】，流れの可視化ハンドブック，朝倉書店，1986.
- [2] 中村海，松田蒼史，八房智顯，木戸口善行，シャドウグラフ撮影画像によるディーゼル噴霧蒸発領域の解析，日本機械学会 中国四国支部総会・講演会 講演論文集，Vol.52, 1105, 2014
- [3] 小林 伸治，春藤 茂，中平 敏夫，小森 正憲，辻村 欽司，レーザシャドウグラフによる超高压噴射ディーゼル燃焼の可視化，可視化情報学会，Vol.11, No.2, p.131-134, 1991.
- [4] Rie Tanabe, Micro-hole Drilling by Ultrafast Laser Pulse Studied through High Speed Movies, Proceedings of LPM2012, 2012.
- [5] T. Ishii, Effects of Liquid Layer on Laser Ablation Studied by Visualization of Transient Stress, Proceedings of LPM2008, 2008.
- [6] 岡本牧子，シュリーレン法を取り入れた光学分野教材開発の基礎研究，日本化学教育学会研究会研究報告，Vol.34, No.2, 2019.
- [7] S. S. Harilal, G. V. Miloshevsky, P. K. Diwakar, N. L. LaHaye, A. Hassanein, Experimental and computational study of complex shockwave dynamics in laser ablation plumes in argon atmosphere, Phys. Plasmas, 19, 2012.
- [8] 浜本嘉輔，富田栄二，綱島美徳，池田幸一，レーザ干渉法による気体噴流濃度の測定，日本船舶機関学会誌，Vol. 25, No. 8, p.12-18, 1990.
- [9] R. Noll, R. Sattmann, V. Sturm, S. Winkelmann, Space-and time-resolved dynamics of plasmas generated by laser double pulses interacting with metallic samples, Journal of Analytical Atomic Spectrometry, Vol. 19, p.419-428, 2004.
- [10] R. Smythe, R. Moore, Instantaneous phase measuring interferometry, Opt. Eng., Vol. 23, p.361-365, 1984.
- [11] 中楯末三，山口一郎，特開平 02-287107, 2次元情報取得装置，1990.
- [12] J. Millerd, N. Brock, Methods and apparatus for splitting, imaging, and measuring wavefronts in interferometry, U.S. Patent 6,304,330, 2001.
- [13] K. Creath, Step height measurement using two-wavelength phase-shifting interferometry, Appl. Opt., Vol.26, p.2810-2816, 1987.
- [14] M. Novak, Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer, Appl. Opt., Vol. 44, p.6861-6868, 2005.
- [15] フォトロン，偏光ハイスピードカメラ，<https://www.photron.co.jp/products/polarizing-cam/>（2022-01-10 最終閲覧）
- [16] 大沼隼志，偏光高速度カメラの動作原理，および産業分野での適用事例，研究報告 音楽情報科学，Vol. 2019-MUS-123, No. 4, p.1-2, 2019.

第2章-偏光高速度干渉法を活用したブルーム挙動定量可視化技術の開発と  
加工能率向上の指針明確化-

- [17] I. Yamaguchi, Phase-shifting digital holography, *Optics letters*, Vol. 22, No. 16, P.1268-1270, 1997.
- [18] J.H. Bruning, Digital wavefront measuring interferometer for testing optical surfaces and lenses, *Applied optics*, Vol. 13, No. 11, p.2693-2703, 1974.
- [19] M Novak, J Millerd, N Brock, M North-Morris, J Hayes, J Wyant, Analysis of a micropolarizer array-based simultaneous phase-shifting interferometer, *Appl. Opt.*, Vol. 44, No. 32, r: *Appl. Opt.*, 44. 32, p.6861-6868, 2005.
- [20] J Millerd, N Brock, J Hayes, M North-Morris, M Novak, J Wyant, Pixelated Phase-Mask Dynamic Interferometer, In *Fringe 2005*, p. 640-647, 2005.
- [21] N Brock, J Hayes, B Kimbrough, J Millerd, M North-Morris, M Novak, J C. Wyant, Dynamic Interferometry, *Proc SPIE*, Vol. 5875, p.5875, 2005.
- [22] R Smythe, R Moore, Instantaneous Phase Measuring, *Interferometry*, *Opt. Eng.*, Vol. 23, No. 4, 23461, 1984.
- [23] O. Y. Kwon, Multichannel phase-shifted interferometer, *Opt. Lett.*, Vol. 9, No. 2, p.59-61, 1984.
- [24] C. L. Koliopoulos, Simultaneous phase-shift interferometer, *Proc SPIE*, Vol. 29, No. 20, p.2399-2401, 2004.
- [25] B. A. Horwitz, A. J. MacGovern, Wavefront sensor employing novel D.C. shearing interferometer, US patent 4575248 A, 1986.
- [26] J. L. McLaughlin, B. A. Horwitz, Real-time snapshot interferometer, *Proc. SPIE* 680, p.35-43, 1987.
- [27] K. Ishikawa, K. Yatabe, Y. Ikeda, Y. Oikawa, T. Onuma, H. Niwa, M. Yoshii, Interferometric imaging of acoustical phenomena using high-speed polarization camera and 4-step parallel phase-shifting technique, *Opt. Express.*, Vol.24, No. 12, 12922, 2016.

## 第3章 産学連携を成功に導く実践共同体の事例研究

### 3-1. はじめに

前章までで示した，加工現象の可視化技術の構築をはじめとした基礎研究やそれに基づく新技術の開発は，一企業のみでは成し得がたい．それは，基礎研究自体には直接的な利益に結び付かず経営者の理解が得られづらく，推進するとしても企業単独ではこれらを遂行するための専門知識に限界があるからである．だからといって基礎研究を行わずに一企業ができる開発のみを行っていても，多様化した市場にマッチした商品を開発できず競争に淘汰されてしまう現実もあり，企業はジレンマを抱えている．この中で有効な解決策が産学連携で，近年の技術開発の高度化や競争激化も相まって盛んに実施されている．本研究においてもレーザ加工の現象可視化に関しては企業単独，つまり「産」のみでは遂行できず，一方で「学」では基礎研究として研究が進んでいたため，「学」と連携することで早期に競争力の高い技術を具現化できると考え，光産創大との共同研究を行い，産学連携を推進してきた．しかし，存在目的が異なる組織体の連携であるがゆえに，成功，すなわち産業上の利益にまで結びつく事例は少ない．

そこで本章では，大学と企業の専門知識や強みを組合せ技術開発に成功した産学連携の事例を調査分析することにより，産学連携を成功に導く仕組みやその特徴を明らかにすることを目的とする．本研究における「成功」とは産業上の利益に直接的に結び付く研究成果を上げることである．

事例の分析には、レイヴとウェンガーによって提唱された実践共同体論を用いる。本章では、産学連携推進に関する先行研究、分析に用いる実践共同体論について説明した後に、研究方法と結果について述べ、考察する。

### 3-2. 産学連携に関する先行研究

産学連携の定義として、原山は「大学と産業という二つの異なるドメインに所属するアクターの相互作用によって、大学と産業の持つポテンシャルがそれぞれ高められていくプロセスである」(p. 3)とし、製品開発を最終目的とする産業と「知識の創造」と教育を目的とする大学という存在目的の違いに立脚しその知識の結合により新たな技術を生み出すものとしている[1]。しかし、存在目的や価値観が異なるが故に円滑に進まないことも多く、成功に導くための方策を導くための多くの研究がなされている。

澤田は大学の存在目的として「産のシステムの大学」と「学のシステムの大学」という2つのモデルの存在を提唱し、企業側と大学側でこの認識が異なると、産学連携の期待と成果のギャップは大きくなり、コンフリクトにつながるとしている[2]。このため、産学連携においては、「大学がどこまで産であることを追求するか、大学がそれを追求しつつも学たりうるか」(p. 8)が課題であり、その解決策の一つとして「コンフリクトに対するコーディネート」(p. 8)が産学連携のコーディネータに求められるとしている。

コーディネータの重要性に関し、藤川や正橋は、コーディネータに求められる能力として、学のシーズと産のニーズをマッチングする基本的な能力に加え、技術の育成、知財価値の強化ができる「付加価値向上機能」がより重要であるとしている[3][4]。また、場合によってはコーディネータ自身が主体となり課題解決

を図ったり、研究を進めることも重要とされ、このような多彩なスキルを持つコーディネータの育成が課題と結論づけている。

また、金井は産と学の価値観の違いに対し、異なる価値観を持った人が一同に会し価値観の差を埋める「場」の重要性について論じ、「場」の中で認識の一致や情報交換が行われることにより円滑な連携が行えるとしている[5]。こうした産学連携の「場」の中では知識が相互に移転されていくが、安田は、「企業研究者の研究室受入と指導」や「定期的な研究会や研究交流」「卒業生や企業研究者との個人的交流」といった非公式の知識移転の実態を調べ、「バラエティに富む多彩なルートの共存」(p. 305)が存在し、それぞれの知識移転ルートが長期的・継続的に続くことが、産学連携の促進に直接寄与していることを示した[6]。

以上のように、産学連携を成功に導くためには「産」と「学」の異なる価値観を認識したうえで「場」やコーディネータを活用しながら価値観や連携の方向性を統一させ、知識を相互に移転させながら推進することが重要だといえる。また、「学」から「産」への一方向の知識の移転では成立せず、知識を受け取る側の「産」すなわち企業に在籍する共同研究推進者は、「学」すなわち大学の研究者や教授の知識を習得したうえで、一体となって取り組むことが重要である。しかし、具体的にどのような流れで知識が移転され習得されていくかについて研究された事例は少ない。それは、産学連携における詳細のやり取りの経緯といった暗黙的な情報は当事者しか持っておらず、産学連携の研究者が当事者を外から調査を行っても情報が得られにくいためではないか。

そこで、本研究では、産学連携を進める中で「産」の共同研究推進者である筆者が、大学との共同研究を通して得た知識の流れを事例的に研究する。

### 3-3. 分析枠組み：実践共同体論

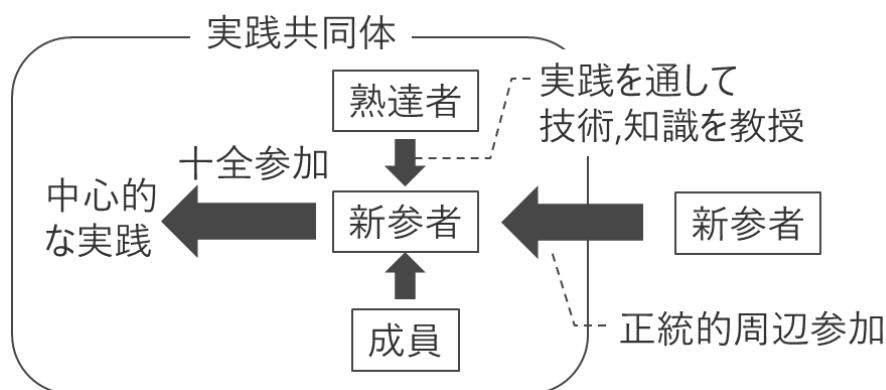
産学連携における相互の学習に焦点を充てるため、実践共同体論を分析枠組みに用いた。実践共同体は、状況に埋め込まれた学習が行われる実践の場として、レイヴとウェンガーによって提唱され、「参加者が自分たちが何をしているか、またそれが自分たちの生活と共同体にとってどういう意味があるかについての共通理解がある活動システム」(Lave & Wenger 1991, p.98：訳書, 1993, p.80) や「あるテーマに関する関心や問題, 熱意などを共有し, その分野の知識や技能を, 持続的な相互交流を通じて深めていく人々の集団」(Wenger, McDermott & Snyder, 2002, p.4：訳書, 2002, p.33) のことを指す[7][8]。図 3-1 に実践共同体の概念図を示す。

実践共同体には技能伝承, 知識の共有, 知識創造といった様々な目的があるが, その根幹は「学習」である。学習の対象は知識に留まらず暗黙的な経験則, 実践知も含まれる。それを教える者も教師や企業の上司といった役職者以外に, その組織に長年在籍し経験を積んだ古参加者が含まれる。実践の行為者は, 共同体の中に新参加者として参画し, 古参加者から参画を認められることにより, 正統的周辺参加を果たす。実践共同体では古参加者が持つ経験則や実践知といった学習資源が集積されているため, 実践の行為者は実践によりこれらにアクセスし用いることで学習することができる。実践の行為者が新参加者として実践共同体の中で課せられる実践の難易度は必ずしも高いものではないが, 一連の実践活動の一部を担い実践共同体へと部分的に貢献することで, 次第に技術や知識をより深く習得する機会が与えられる。このようにして実践の行為者は実践共同体の保有する学習資源を獲得する一方で, 自身のアイデンティティが形成され, 次第に自発性や組織への求心力が生まれる。参加当初は周縁的であった実践共同体への参加が主体的なものへと変わることにより十全参加へと移行し, 最終的に実践共同体の中心的な役割を担うようになる。こうして当初新参加者であった実践の

行為者は共同体の学習資源を習得するとともに共同体を主体的に運営する古参者となることで、共同体及び保有する学習資源の継続に貢献する。

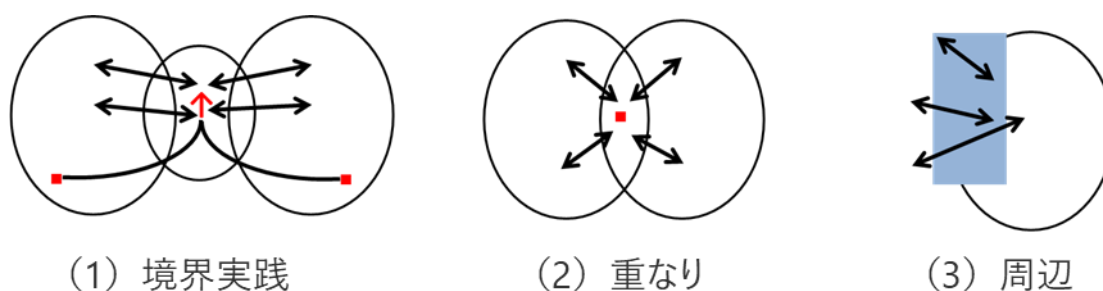
実践共同体の拡張や変容について、ウェンガーは複数の実践共同体が知識を授受することで作用し合い、実践共同体が拡張する場合もあると主張している。この時実践共同体の間をつなぐものとして、バウンダリー・オブジェクトとブローカーを提示している。バウンダリー・オブジェクトとは、人工物や書類、概念といった物象のことで、スターとグリセマーが博物館設立時の事例調査により見出した概念である[9]。スターとグリセマーは、博物館に関わる専門家やアマチュアといった異なる実践共同体の成員の認識を統一するために、標本や展示品などがバウンダリー・オブジェクトとなり、異なる実践共同体をつなげる役割となることを見出した。一方ブローカーとは、複数の実践共同体に参加し、ある実践共同体の知識を他の実践共同体に仲介することで、実践共同体を拡張させる存在である。ゲラーディとニコリーニは、建設現場において、技術者、現場監督、主契約者の各実践共同体における安全への意識の相違に対し、現場監督の現場での実践というブローカリングによって、技術者と主契約者の実践共同体に影響を与えたことを示している[10]。

バウンダリー・オブジェクトとブローカーによって複数の実践共同体が作用する種類に関し、ウェンガー[11]は3つの種類を提示している。(1)境界実践、(2)重なり、(3)周辺である。各種類の模式図を図3-2に示す。(1)境界実践とは、複数の実践共同体の成員が新たな実践を行うものである。これは成員が多様性がある際に見られやすい形態である。(2)重なりとは、複数の実践共同体自体が重なり合うことで新たな実践が発生するものである。(3)周辺とは、実践共同体の境界が開放され、外部からの情報のやりとりが行われることによるつながりのことである。以上のように、実践共同体は単体で作用するだけでなく、複数の実践共同体が作用し合うことにより、変容、拡張していくものである。



出所：[7]を基に筆者作成

図 3-1 実践共同体の概念図



出所：[11]より引用

図 3-2 複数の実践共同体が作用する種類

バウンダリー・オブジェクトとブローカーによって複数の実践共同体が作用し変容または拡張する事例については数多くの研究がなされている。カーライルは企業における新製品の開発プロセスを調査し、バウンダリー・オブジェクトが各部門の実践共同体の成員を繋ぎ、知識を表象、学習、変容させる効果を発揮し、課題解決につながっていることを見出した[12]。松本は、陶磁器産地における技能の伝承と発展について調査し、複数の実践共同体の成員が親睦会、展示会、組合等の集まりにより情報や技能が相互補完される過程を見出した[13]。森下・増田は、新事業開発における市場調査の実践についてセルフエスノグラフィー調査を行い、実践共同体を援用し分析している[14]。その結果、複数の実践共同体に所属する実務者が、単一の実践共同体の枠組みを超えて実践を拡張させた

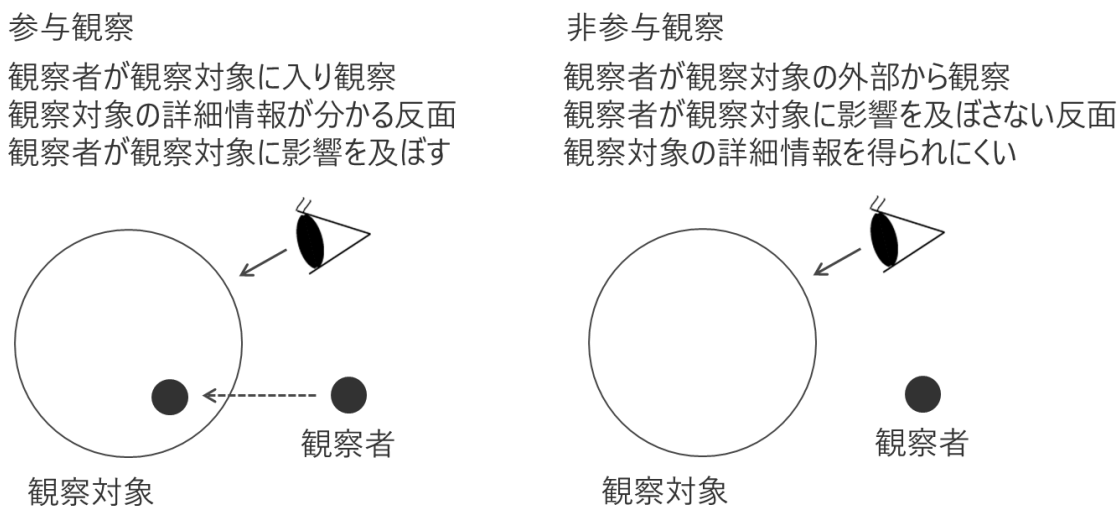


ことで、ブローカーの役目を果たし(2)重なりを促進し、実践共同体に他の実践共同体からのアイデアを持ち込むことにより実践を変容させたことを明らかにしている。

### 3-4. 研究方法：内部観測法

本研究では、産学連携の実態をより詳細に理解するために産学連携の実践を最も近くで調査分析できる方法として内部観測法を採用した。内部観察法の説明にあたり、一般的なフィールドワークの方法を整理したうえで、内部観測法の特徴について述べる。フィールドワークの手法については、ゴールドとジャンカー、ヒューズが整理している[15][16]。フィールドワークにおける研究者の視点には、「完全なる観察者 (complete observer)」、「参加者としての観察者 (observer-as-participant)」、「観察者としての参加者 (participant-as-observer)」、「完全なる参加者 (complete participant)」の4つに分類される。この中で、「完全なる観察者」は、非参与観察とも呼ばれ、観察者が観察対象には直接参加しない部外者としての立場の観察となる。このため、観察対象が観察者によって変化してしまう懸念がない一方、観察者は観察対象の詳細まで深く調査することができない課題がある。「参加者としての観察者」は、参加よりも観察に重点が置かれた観察方法で、インタビューやアンケート等の調査の際に観察を行う。「観察者としての参加者」は、参与観察と呼ばれ、観察者自身が観察対象の集団に参加し、観察対象と行動を共にすることによって観察対象を観察する方法である。「完全なる参加者」は観察者が観察対象に完全な参加者として参加し、対象に調査していること自体を気づかれないようにする方法である。この方法は観察対象の情報が最も多く収集できる反面、観察者が観察対象に密接に関わるため、観察対象に

変化を及ぼしたり、観察者の客観的な解釈や分析を阻害する懸念がある。参与観察と非参与観察の違いを図3-3に示す。



出所：[19]より引用

図 3-3 参与観察と非参与観察の違い

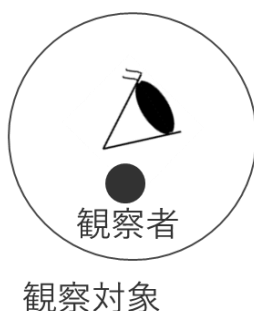
内部観測法は、郡司が提唱した内部観測を、増田が社会科学における研究方法として定式化した[17][18][19]。図3-4に概念図を示す。内部観測法とは、観測対象の中に入り込み、観測対象が進行中の事象を直接観測する観測法である。この時、観測者は観測対象と切り離すことができず、観測者の介入によって観測対象に影響を与える事があるし、観測者自身も観察対象に入り込み介入することで視座が変化するが、これも含めて絶えず変化する局所的な現象を記録・分析する。本方法の利点は、外部研究者が研究対象組織に入り込み研究を行う参与観察

と異なり、外部研究者が入手することができないデータを取り扱えることである。内部観測は経営学の分野でも展開がみられ、武田・増田による中小企業経営者による中小企業経営者の進化論に関する研究[20]や、藤原・増田が研究者自身がアングラで研究行為を行うブートレグ行為という通常は表に出ることがない技術開発実践の方法論に関する研究[21]に用いている。

本研究の目的は産学連携を成功に導く仕組みを明らかにすることであり、そのためにこれまでわからなかった産学連携を推進中の情報や知識のやり取りを明らかにすることである。そのためには、外部研究者が調査を行うのではなく、研究者＝実務者となって産学連携を実践しその行為を分析するのが最も適していると考えた。よって本研究では、内部観測法を用いて、研究者自身が実務者となり産学連携を調査分析する方法を採用した。

#### 内部観測

観察者と観察対象は切り離せず、  
必ず観察対象に影響を及ぼす  
観測者は徹底的に観察対象に内在するため  
観察対象の情報を最も多く得られる



出所：[19]より引用

図 3-4 内部観測法の概念図

本研究の調査対象は、筆者である研究者＝実務者 X が実施した研究行為である。研究者＝実務者 X が所属する自動車部品メーカー A 社は、光を用いた新技術開発と開発マネジメント方法の開発を目的に 2016 年 8 月に光産創大と共同研究契約を締結し産学連携活動を開始した。研究者＝実務者 X は本件の主担当者として共同研究を推進すると同時に、研究を加速させるために 2017 年 4 月に光産創大に学生として入学し研究を進めている。

研究を進めるにあたり、まず研究者＝実務者 X が光産創大で行った研究をセルフエスノグラフィにより記述した。調査対象とする期間は、研究者＝実務者 X が光産創大で研究を開始した 2016 年 8 月から研究を完了した 2018 年 7 月までとし、議事録、メモを手掛かりに実践を記述した。そしてその実践について分析を行った。次にこの考察で得られた知見の含意をより明確にするために、関係者にインタビュー調査を行った。インタビュー調査の概要を表 3-1 に示す。

表 3-1 インタビュー概要

日にち	場所	時間	インタビューイ
2020/3/16	光産創大	1 時間 30 分	教授 F
2020/3/30	光産創大	1 時間 00 分	教授 H

## 3-5. 事例研究

### 3-5-1. 事例の概要

2016年8月、自動車部品メーカーA社に所属する研究者=実務者Xはレーザを用いた生産技術に関する開発を行っていた。開発にあたり研究者=実務者Xは社内のみで開発を行うことに限界を感じていた。それはレーザ加工技術の研究開発には高度な知識と技術が必要であり、企業や研究者=実務者Xのみでは遂行が困難であるためである。そこで業務内容を把握していた社内のレーザの専門知識や社外との関わりが深い社員Yの仲介により、光産創大B研究室の教授Cと出会い、共同研究契約を締結し、研究を開始した。教授Cと議論を重ねるうちに加工現象を可視化する必要性に至り、B研究室が保有する知識に基づき可視化手法の調査を行い、最も適している手法について大学にて装置を構築し実験を行うことになった。可視化手法の調査および装置構築の主担当として助教Dが充てられ助教D主導の下ベンチマークが進められた。研究者=実務者Xは光技術の専門性向上と研究推進のため、2017年4月に学生として入学し、大学講義も受講しながら助教Dの指導の下可視化装置を構築していった。2017年8月に装置が完成し評価を開始したが、目標とする結果が得られず、助教Dとともに原因究明を進めるも打開策は見いだせない状況であった。そこで研究者=実務者Xは、原因究明と並行して別の方法がないか情報収集を行ったところ、2017年10月に有力な文献を発見した。しかしその文献の内容はB研究室の専門外の内容であり、B研究室の関係者では解読ができない状況であった。この時、研究者=実務者Xは大学講義で知り合った教授Fの存在を思い出し、教授Fであれば文献の専門分野にも近く解読可能なのではないかと考えた。そこで、研究者=実務者Xは所属外であったものの教授Fに直接声をかけ、研究への参

画を打診した。教授 F は文献を見て自分で解読可能であると判断し、研究への参画を快諾してくれた。教授 F の指導の元 2017 年 11 月に基礎評価を実施し、目標通りの評価結果がでるポテンシャルがあることを確認した。さらに文献の情報に基づき研究者=実務者 X が目的としているレーザ加工プロセスを評価するための可視化装置を教授 F の指導の元製作し評価を実施し、目標通りの結果を得ることができた。図 3-5 に関係者を整理したものを示す。

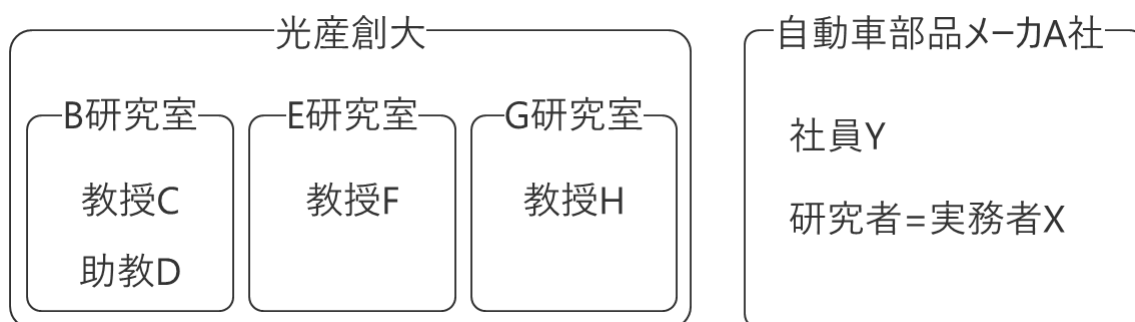


図 3-5 事例における関係者

### 3-5-2. 事例の記述

本項では、研究者=実務者 X が光産創大で研究を開始した 2016 年 8 月から共同研究契約を完了した 2019 年 10 月までの研究行為について、セルフエスノグラフィにより観察した事例を記述する。また、実践共同体の形成や変容について重要な期間である、2016 年 8 月から 2018 年 5 月までの研究者=実務者 X が行った研究を時系列でまとめた結果を図 3-6 に示す。

■2016年6月

研究者=実務者 X は超短パルスレーザを用いた微細加工技術の量産工程への適用に関する業務を推進すると同時に、競合他社に対して差別化を図るため、競争力の高い独自のレーザ加工技術の開発を企画し、社内で量産適用しているレーザ加工を用いた微細加工工程に対し課題抽出を開始した。

■2016年7月

レーザ加工工程の現状分析を行ったところ、微細形状加工にレーザ加工を適用した場合、加工により排出された加工くず（プルーム）が加工中に加工点周辺に滞留し、レーザの投入を阻害し加工能率が低下している可能性があることが分かった。これを明らかにするためにはレーザ加工中における加工点の加工現象を可視化し、加工阻害の定量化が必要であると考えた。しかし研究者=実務者 X や A 社では可視化を実現するための技術は保有しておらず、先行研究を調査したものの研究者=実務者 X が得たい可視化を達成できる手法が見つからない状況であった。

■2016年8月

筆者の研究内容を日常的に把握しており光産創大の教授 C と知り合いであった A 社社員 Y は、教授 C と会った際、研究者=実務者 X が抱える課題を思い出し、A 社が実施しようとしているレーザ加工技術の開発の状況や課題に対し説明した。その時、教授 C は自身の B 研究室において超短パルスレーザを用いた微細加工の研究を行っていたため、その研究内容や保有技術を社員 Y に説明するとともに、光産創大と A 社で技術的な交流をもてないか提案した。社員 Y は光産創大の保有技術を活用すれば、筆者が検討している可視化技術の開発を加速ができると考えた。後日社員 Y は、研究者=実務者 X に光産創大の研究内容を伝え、共同研究の必要性を検討するよう助言した。

■2016年9月

研究者＝実務者 X は社員 Y とともに教授 C と会い、課題の共有や研究方針について議論を重ねた。教授 C は、まず B 研究室が保有する計測器を用いて可視化を行うこと、それを行いながら世の中の可視化手法を調査し、B 研究室が保有する技術を用いて可視化装置を具現化し研究を行うことを提案した。研究者＝実務者 X は教授 C 提案の研究方針に賛同し、光産創大との共同研究の企画をまとめ、光産創大と A 社で共同研究契約を締結し、共同研究がスタートした。

■2016年10月

教授 C は助教 D を共同研究の担当とした。助教 D が主担当となり B 研究室が保有する計測器を用いた加工現象可視化の準備を行いながら、先行研究を調査し、研究者＝実務者 X が目標とするものに近い技術の抽出を開始した。

■2016年11月

研究者＝実務者 X は教授 C、助教 D と実験内容や先行研究の調査結果について打合せを定期的実施したが、知識が少ないことから解釈に時間がかかった。開発を加速させるため、教授 C は研究者＝実務者 X に光産創大への入学しレーザーに関する専門知識を習得するとともに、B 研究室に所属しながら研究を行うことを勧めた。研究者＝実務者 X は光産創大への入学を決断した。

研究者＝実務者 X は入学への準備をしながら光産創大に定期的に足を運び、学内にて助教 D 主導のもと加工現象可視化の実験を開始した。

■2017年3月

研究者＝実務者 X は助教 D とともに光産創大にて光産創大保有の計測器を用いて加工現象可視化実験を行ったが、目標とする結果は得られなかった。一方、先行研究を調査した結果、シュリーレン法が最も一般的でレーザー加工における



加工現象可視化に用いられていることがわかった。研究者＝実務者 X はシュリーレン法を用いてレーザ加工現象の可視化を行うために、B 研究室の技術に基づいて可視化装置を製作することにした。

■2017年3月

助教 D はシュリーレン法を基にした加工現象可視化装置の構想検討を開始した。研究者＝実務者 X も構想検討と設計に参画し、助教 D からシュリーレン法の原理や構想を教えられながら検討を進めた。

■2017年4月

研究者＝実務者 X は光産創大に入学した。教授 C の主催する講義のほか、単位を取得するため、教授 F の主催する光学に関する講義も受講することとした。

■2017年5月

研究者＝実務者 X は学生として教授 F の講義を受けた。そこで教授 F の専門分野を認識し、光の計測技術に関する基礎知識を習得した。

研究者＝実務者 X は、講義と並行して助教 D から可視化装置の構造について指導してもらい、具現化しようとしている可視化装置について理解を深めた。研究者＝実務者 X は本研究内容について学会発表及び論文投稿が行えるよう、先行研究調査と構築しようとしている研究の新規性の確認を実施した。その結果、今回製作しようとしている可視化手法は世の中で最も用いられている一方、研究者＝実務者 X が目標としている結果が得られている先行研究は見つからなかった。そのため、研究者＝実務者 X は本手法では確実に筆者の目標が達成できないのではないかと不安を感じつつ、早期に実験を行うことで従来手法の

課題を抽出し、その結果に基づき新たな技術に向上させる考えで具現化を進めた。

■2017年6月

研究者＝実務者 X は従来手法に基づく可視化手法を早期に具現化するためには、A社の治具設計製作部署と連携し A 社内で製作する事が最適だと考え、助教 D に A 社に来てもらい、A社の装置設計技術者も交えながら可視化装置の構想を具体化した。研究者＝実務者 X の所属長に可視化装置の必要性を説明し承諾を得、製作予算を確保した。こうして A 社の装置製作部署で可視化装置製作を開始した。

■2017年8月

A社で可視化装置が完成し、研究者＝実務者 X は、光産創大にて助教 D 主導の下、装置の調整を開始した。

■2017年9月

研究者＝実務者 X は助教 D 指導の下、製作した可視化装置を用いて実験を行ったが、目標とする結果は得られなかった。助教 D と研究者＝実務者 X は実験室で現象を共有し、原因追究と対策実施を繰り返した。しかし、事態は進展しなかった。

■2017年9月

教授 C は、研究者＝実務者 X と助教 D の実験の進捗を聞き、研究を確実に進めるためには、他研究室の知識も活用することが必要だと考え、G 研究室の教授 H を研究者＝実務者 X の指導教員として充てることを考え、教授 H にその件を打診した。教授 H は研究者＝実務者 X の指導教員になることを快諾し、教授

Hは研究者＝実務者 Xの指導教員となった。研究者＝実務者 Xは、これまでの研究内容を教授 Hと共有し、研究方針に対する議論を開始した。

#### ■2017年10月

継続して原因究明を行うものの改善の兆しは見られなかった。研究者＝実務者 Xは研究がとん挫してしまうことに不安を感じ、大学での講義で得た知識を基に再度文献調査を開始した。その時偶然 A社の社内研究で偏光高速度カメラを用いて材料の複屈折現象に関する解析している研究者と話をする機会があった。この時、研究者＝実務者 Xは、屈折率の変化という観点で偏光高速度カメラを用いれば可視化ができるのではないかと考え、偏光高速度カメラを光産創大に持ち込み、実験を行った。実験の結果、加工点がわずかに変化している様子は確認できたが、目標には大きく届かなかった。しかし、屈折率に着眼すれば可視化が実現できるかもしれないという気づきが得られた。

研究者＝実務者 Xは、この結果に基づき偏光高速度カメラを用いた屈折率評価というキーワードで文献調査を継続した。その結果、偏光高速度干渉法を用いて音波が伝わった時の空気の粗密を可視化した文献を発見した。これは、レーザ加工の可視化そのものではないが、この手法を活用すれば筆者の目標を達成できる可能性がうかがえた。研究者＝実務者 Xは、偏光高速度カメラのテスト結果とこの文献を基に教授 C、助教 Dに相談したが、二人はその内容を理解することはできなかった。

そこで、研究者＝実務者 Xは教授 Fの講義を思い出し、教授 Fであればこの内容を理解できるのではないかと考えた。そこで、筆者は教授 Fが実験室前の廊下を通りかかった際に教授 Fに直接声をかけ、調査した可視化手法を見せたいと内容が理解できるか聞いた。教授 Fはその場で文献を見て、内容を理解できず研究者＝実務者 Xが行おうとしている可視化にも適用できると言った。研究者＝実務者 Xは研究を進めるためには調査した可視化手法の具現化が必要で

あり、そのためには教授 F の本研究への参画が必要と考え、教授 F に研究への参画を打診した。教授 F は参画を快諾した。

#### ■2017年11月

研究者=実務者 X は偏光高速度干渉法を用いた可視化の可能性を検討するために、教授 F 主導のもと E 研究室が保有する光学系を活用し基礎的な検証を行うこととなった。研究者=実務者 X は教授 F から偏光高速度干渉法の原理、光学配置、解析方法の指導を受けながら基礎検証を行った。実験の結果、空気の粗密を高精度に計測できることが確認でき、目標とするレーザ加工時の加工噴出物可視化が実現する可能性が高いことが分かった。しかし、研究者=実務者 X が対象とする加工現象はとても小さく、かつ高速な現象であるため、狭小領域の高速現象を可視化することが課題であることが分かった。また、可視化像を得るためには偏光高速度カメラで得られた像を計算し処理することが必要であり、処理ソフトを製作する必要があることも分かった。研究者=実務者 X は教授 F とこれらの課題を共有するとともに、教授 F の指導の下、課題に対し対処を始めた。

#### ■2017年12月

研究者=実務者 X は狭小領域を拡大して可視化ができるようにするために、A 社内で高速度カメラを保有する部署に聞きまわり、仕様を満足できるような拡大レンズを借用する目処をたてた。また、高速現象を可視化できるようにするために、発振器メーカーや高速度カメラメーカーに相談し、発振器と高速度カメラを同期動作させる対応方法を考えた。処理ソフトを具現化するために、研究者=実務者 X は教授 F からソフトウェアのプログラミングに関する指導を受け、処理ソフトの製作を開始した。

こうした取り組みにより、研究者＝実務者 X は偏光高速度干渉法を活用した可視化技術は具現化可能であると判断し、研究方針の変更を関係者に伝え了承を得ようと考えた。研究者＝実務者 X は光産創大と A 社の共同研究の進捗を共有する場を設け、偏光高速度干渉法を活用した可視化技術の実現可能性と、研究方針の変更について報告した。その際、偏光高速度干渉法を用いた可視化装置の製作を加速させるため、共有の場には研究者＝実務者 X の A 社における所属部長を招き、共有会では教授 F にお話し、教授 F から直接偏光高速度干渉法の原理や有効性を説明してもらいながら話を進めた。研究者＝実務者 X の所属部長は偏光高速度干渉の有用性や実現可能性を理解し、研究者＝実務者 X の研究が加速できることを認め、偏光高速度干渉法を用いた可視化装置の製作を了承した。研究者＝実務者 X は開発予算を調達し偏光高速度干渉法を活用した可視化装置の製作を開始した。

■2018年3月

教授 F 指導の下、研究者＝実務者 X は可視化装置を製作し、光産創大で実験を行い、目標通りの結果を得ることができた。

■2018年5月

研究者＝実務者 X は本研究内容をレーザー加工学会で発表した。

■2018年6月

研究者＝実務者 X は本研究内容を応用物理学会光波センシング研究会で発表した。

■2019年2月

研究者=実務者 X は研究をさらに進め、プルームがレーザーの投入を阻害し加工能率低下に影響を及ぼしていることを明らかにした。さらに、プルームとレーザーの干渉を回避することにより加工能率向上が実現できると考え、加工能率を向上できる手段の開発に着手した。

■2019年9月

研究者=実務者 X は加工能率向上を実現するための実験を重ね、加工能率を従来に比べ1.28倍向上できる技術を実証した。

■2019年10月

研究者=実務者 X は自動車部品メーカー A 社と光産創大との共同研究の目的は達したと考え、共同研究契約を完了することとした。自動車部品メーカー A 社と光産創大との共同研究は、加工能率向上を実現できたという産業上の利益に直接的に結び付く研究成果を上げ、完了した。

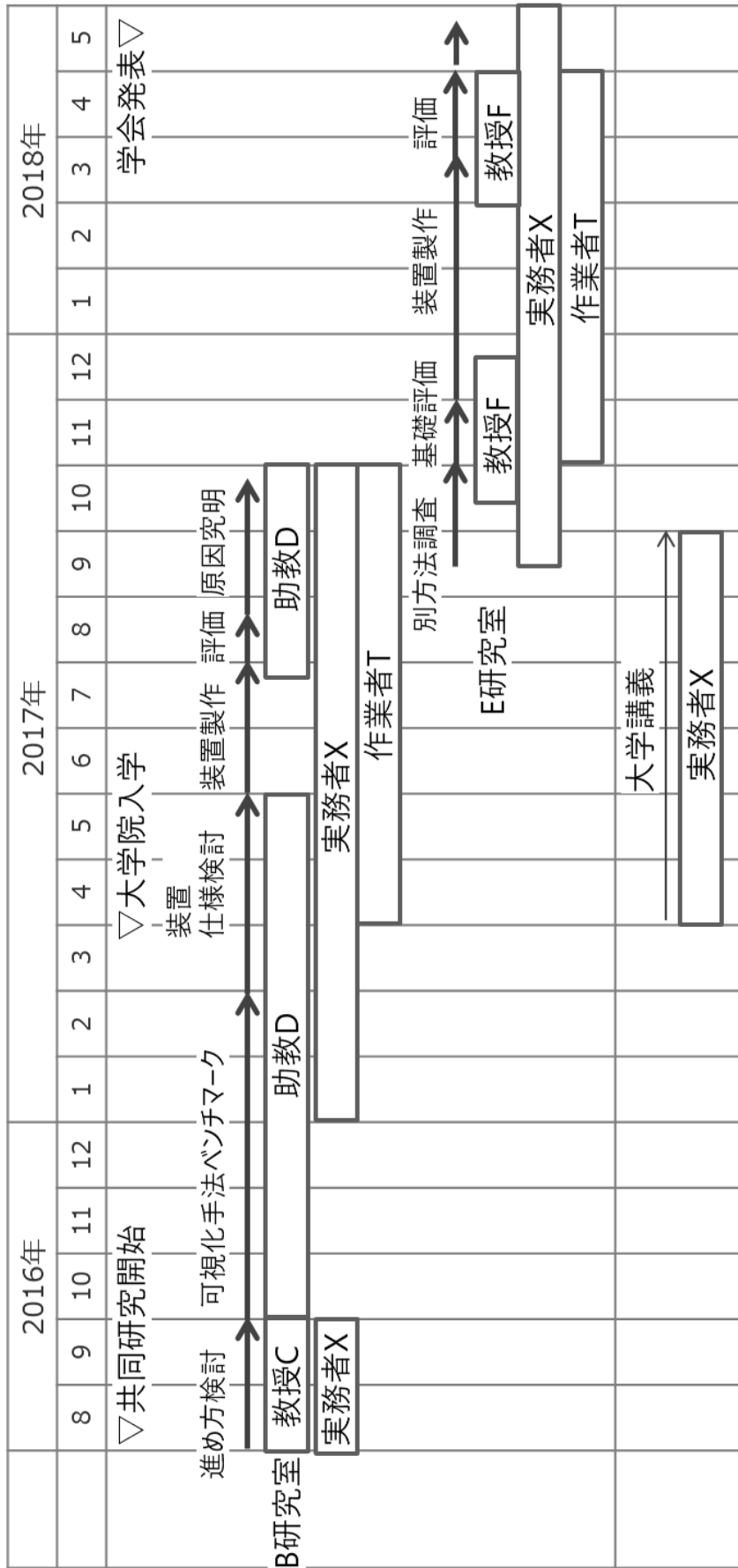


図 3-6 研究者=実務者 X が行った研究の推移

### 3-5-3. 事例における実践共同体

本研究の事例を実践共同体の枠組みで考察する。本研究の事例では2つの実践共同体が形成された。共同研究開始時点の教授Cの研究室と、研究の途中から教授Fと研究者=実務者Xの共同体である。

2016年8月の共同研究開始時点の実践共同体の模式図を図3-7に示す。研究者=実務者Xは光産創大とそこに所属するB研究室の実践共同体の保有知識や技術を情報として得て、自身が持つ課題を解決できる期待感を持ったため、B研究室に正統的周辺参加をした。B研究室の実践共同体の中で、研究者=実務者Xは熟達者である教授Cや助教DからB研究室が保有する光技術や可視化手法の知識を、実践を通して習得した。

さらに、2017年4月には研究者=実務者Xは光産創大に入学し学生として教育を受けながら研究を遂行するようになった。このため、研究者=実務者Xは光産創大という実践共同体にも正統的周辺参加を果たした。光産創大の実践共同体の中で、研究者=実務者Xは教授C以外の大学内の教授陣を熟達者とし光産創大の実践共同体が保有する知識を大学の講義を通して習得した。それと同時に、研究者=実務者Xは光産創大内の実践共同体における複数の熟達者が何に熟達しているかを認識した。

研究がうまくいかず教授Fが参画した2017年11月頃の実践共同体の模式図を図3-8に示す。研究者=実務者Xは、B研究室の実践共同体の中で実践を行いながら、B研究室の実践共同体の知識のみで自身の実践がうまくいくか、光産創大の実践共同体における教授C以外の熟達者が保有する知識のうち自身の実践がよりうまくいくものはないかを考えていた。そしてB研究室の実践共同体の知識のみでは研究者=実務者Xの実践がうまくいく見込みがないと判断すると、当初所属していたB研究室の実践共同体の知識よりも教授Fの知識を習得する方が自身の目標を満足できると考えた。しかし、教授Fの所属であるE研



研究室はレーザー加工プロセスの内容とは離れる研究を扱っていたため、E 研究室自体に所属しようとはせず、研究者=実務者 X が教授 F に直接教えを乞うため研究者=実務者 X と教授 F の間に新たな実践共同体を形成した。その実践共同体の熟達者である教授 F から課題解決につながる知識を伝承されたため、課題解決に至ったと考えられる。以上のことから、研究者=実務者 X は、最初に正統的周辺参加をした実践共同体で実践を行う中で、自身の実践が所属する実践共同体の知識のみでうまくいくかを考えるとともに、周辺に存在する熟達者の特徴を認識していた。研究中に生起する不測の課題が発生すると、解決するために必要な知識や技術を保有する熟達者が他にいないかを考え、最も課題を解決する可能性が高い知識を保有する熟達者を見つけると、それを習得するために師事する熟達者を柔軟に入れ替え新しい実践共同体を生み出していることが明らかとなった。

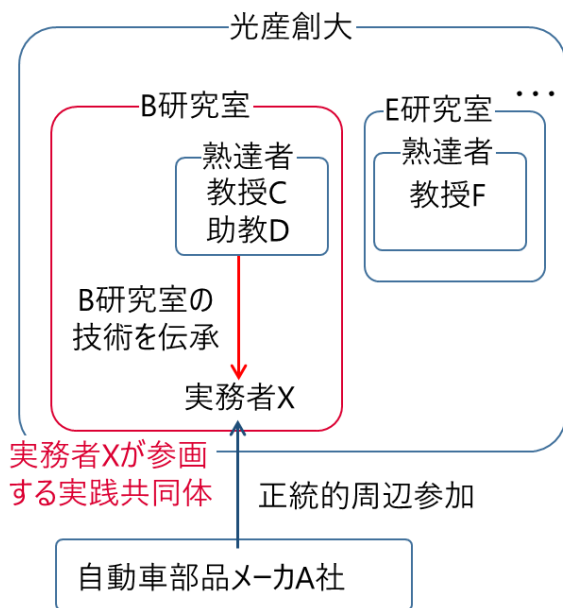


図 3-7 2016年8月 共同研究開始  
時点の実践共同体

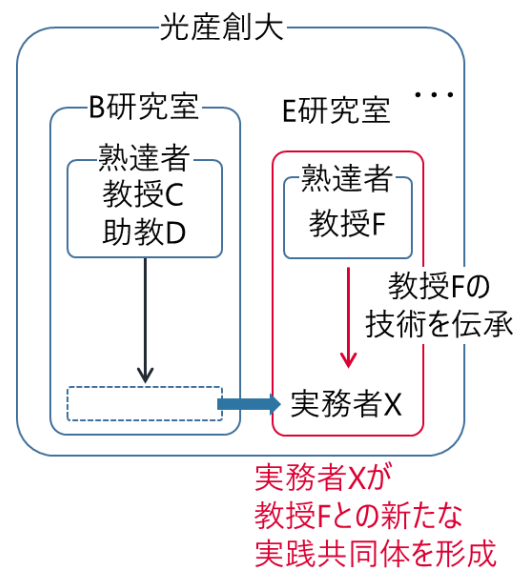


図 3-8 2017年11月時点の  
実践共同体

研究者＝実務者 X の動きはブローカーの動きとも異なると考えられる。ブローカーは複数の実践共同体に参加しながら、ある共同体の実践を他の共同体に伝え広げる存在である。一方で研究者＝実務者 X は自身の実践の目的を果たすために必要な知識を考えそれを保有する実践共同体を選択し、乗り換えが必要であるとなれば柔軟に教授 F との新たな実践共同体を形成する行動をとっている。この点で研究者＝実務者 X の行動は、ブローカーの行動とも異なると考えられる。

また本事例を産学連携の推進という観点でみると、『産学官連携による共同研究強化のためのガイドライン』における「部局横断的な連携」(P7) の実践事例といえ、従来困難であった組織が一体となった連携事例といえるのではないだろうか。本事例がこのようにうまくいった理由はなにか。その理由は、研究者自身の行動と研究を行う「場」の2つに特徴があると考えられる。

研究者自身の行動について。研究者＝実務者 X は新参者として熟達者である教授 C や助教 D から技術を学ぶために、B 研究室に正統的周辺参加をした。正統的周辺参加をした後の新参者は、通常であれば技術を習得しながら所属する実践共同体に対する帰属意識が生まれ、暗黙的にその中で解決しようという考えが生まれてしまう。特に研究行為の成果としては産業への貢献まで至らなくとも学会発表や論文、学位取得等も含まれるため、B 研究室の技術のみ、つまり手持ちの技術で何とかしようと思えばできるであろう。しかし、研究者＝実務者 X は所属企業である自動車部品メーカー A 社のミッションも併せ持っていた。このミッションは事業と直結しており、ミッションの成否による影響も具体的に想像することができたため、研究者＝実務者 X は研究行為を産業上の成果に結びつける意識や成果に結びつかなかった時の具体的な影響を常に念頭に置いて行動していた。このため、不測の課題が発生した時に、研究者＝実務者 X は研究行為に関し、当初所属した実践共同体の中で得られた技術の活用にのみとらわ

れることなく、最終的な産業上の目的を基に課題に対して必要な技術を考え、柔軟に師事する教員との実践共同体を作り出しながら推進できたと考えられる。

研究を行う「場」について、研究者＝実務者 X は、最初に所属した実践共同体である B 研究室外の教授 F との新たな実践共同体を作り出そうとしたが、この時、最初に所属した実践共同体の熟達者である教授 C は否定することなくむしろ歓迎する反応がみられた。このため、研究者＝実務者 X は円滑に教授 F との新たな実践共同体を形成でき、不測の課題を解決できる知識を得ることができた。一般的な大学では、大学自体の成果よりも研究室単位での成果が重要視される傾向にあり、所属の研究者が他の研究室に乗り換える行為は、単一の研究室の成果にはならないため歓迎されづらい。一方で光産創大ではそのような研究室単位での成果にはこだわらない姿勢が見て取れた。その理由について、光産創大が一般の大学の延長線にない建学理念のもと開学し、大学の運営を軌道に乗せるまでの試行錯誤の経験に理由の一端をたどることができる。

光産創大は、光技術に基づいた産業発展に貢献できる起業家の育成を目的として 2005 年に浜松ホトニクス株式会社の創業者の一人である晝馬輝夫同大学初代理事長により設立された、標準就業年限 3 年の博士後期課程のみの大学院大学である。一般的な大学と大きく異なる点は、起業家育成のため入学者は社会人のみを対象としており、所属企業の課題に基づいた研究テーマを設定し、新事業開発や企業実践に重点を置きながら教育する点にある。大学の規模は入学定員 10 名、専任教員は 13 名と小規模であるが、技術系の教員のみならず、経営系の教員も在籍しており、事業実践にまつわる広範な教育が受けられる。また、修了時には光産創大のみである博士（光産業創成）が与えられる。

こうした一般的な大学とは存在目的が大きく異なる機関であるがゆえ、開学時に大学時に所属した教員は、それまでの所属の風土との違いから、最初は大学の存在目的を深く理解できずにいたが、教員間で議論を交わしながら大学の運

営を実践することで理解を深めていった。この光産創大の目的を教員が認識していく過程を教授Hはこう述べている。

産業ってまあ結局その民間の事業活動の中で、お客様にこう喜んでいただくっていう対価をもらうっていう取引がベースの中で、やっぱり学会とはこう違う価値観の部分がやっぱりあるので、まあそちらに合わせたあの活動っていうのはやっぱり開学以来ずっと意識してきた。というかせざるを得ないというか、そこが大事だっずっと理事長にも言われてきて。

ご経験のおありの先生方は、ご経験をベースにやっぱり考えるので、あの、研究として面白くないとか。研究として新しくないから価値がないとか言うんですよね。で、それが今となってはものすごく伸びていたりもするので。本当に我々が見ている視野は狭いというか限定的なので、あんまりね、ダメだとか言うのは論理的にむちゃくちゃ難しいんですけど。そういうところの苦労は最初はけっこうありましたね。

社会的な意義っていうとちょっとかもしれないですけど、やっぱり新しいコンセプトの大学っていうのが社会的挑戦だったんだと思うんですよね。でいままでの研究者研究者した人を集めざるを得ないっていう制度上の話もあって、こう産業寄りに考えられる人はほとんどいない状態で、でも産業のために役に立ってミッションがあって、で、やっぱりいろいろ紛糾を呼ぶわけですね。

このように、開学時に光産創大に正統的周辺参加した教員は、この実践共同体の目的を理解し十全参加に至る際、教員間で目的に対する理解が異なり、意見を交わしながら十全参加へと向かっていった。

また、光産創大の実践共同体の目的は、初代理事長である晝馬輝夫氏が作り出しているが、光産創大の運営過程で晝馬輝夫氏の考えを教員が聞く場が定期的

に設けられ、教員は晝馬輝夫氏の対話によって目的の概念を理解していった。この時の過程を教授Hは次のように述べている。

理事長と学生さんが一対一でやるときにはまあ指導の教員としてはいいので、やっぱりそこで言った位置のやりとりをしながら、こういう方向だというのをとくとくと説くので。指導教員も入って、一緒に絞られる。厳しいというか本質をいつもこうびしっと。本当にそれでお客が喜ぶのか。誰が、どこの誰が喜ぶんや。みたいな。これはそんなに価値があることなのか、とか。

晝馬輝夫氏の考えを定期的に対話によって大学の存在目的に関する概念を直接聞き、教員間で議論することを繰り返すことで、実践共同体の成員である教員は光産創大の目的を理解し十全的になっていったと考えられる。以上のことから、光産創大が組織的に取り組める理由の一つとして、開学時に光産創大の成員である教員が十全参加に至る際、実践共同体の目的に関し議論を重ねながら具体化していったプロセスが元となっていると考えられる。

また、大学が開学し学生を受け入れ運営していく過程にも組織的に取り組める風土が形づくられてきたと考えられる。光産創大は創設時に様々な研究機関から研究者が集まったため、開学した時点では大学固有の技術は形成されていなかった。このため、開学時に入学した学生は様々で、教員が保有する技術によって解決できるとは限らないものである場合もあり、その中でも大学を運営していくことが必要であった。このため、教員間が知識を出し合って解決する必要に迫られた。この時の状況を教授Fは次のように述べている。

僕は大学から来て、大学以外から来た人もいるけど、今みたいな大学という形は全然出来上がっていないというか、何も出来上がっていない状態でスタートしたと。で、初期の段階1年目とかだから学生が入って大学がスタートと同時に、えーっと教員も新たに集まってほぼ全員そろったので、その時点ではまだ何も何も出来上がってなか

った状態からスタートした。で、そこからまあえーっと学生はいるし学生のテーマはすでに決まっているし、でどう対応していくかっていうのをもう走りながら教員みんなでこう考えながら作ってきたっていうところですね。で、やってくうちに学生がえっとテーマを持ってくるので、自分の研究を学生がやるっていうのが普通の大学だと。先生の研究を大学の学生がやるけど。うちはそうじゃないので、そうするとあの一人では対応できないだろうっていうことで、複数で見えていくっていうのが自然にできてきた。

教授 H は次のように述べている。

学生さんがテーマを持って入ってくるっていうのが 1 年目から当然あって、そうすると我々のねえ、すごく狭い細分化された専門分野に対してドンピシャの人はそういないわけですよ。やっぱり幅を広げざるを得ない。その連続でしたね。一つの加工関係のテーマを持った、学生さんが来られて、自分がどこに貢献しようってみんな思うから、なんかこう、みんなで集まって、どうしようかねとか。あの、けっこう自由にというか、アナーキーというか、結構そんな感じで、みんなで寄ってたかって。という雰囲気はありましたね。

このように、開学時点で様々な課題を持つ学生の課題を解決し研究を遂行するために、複数の教員が集まって実践を行う風土が形作られたと考えられる。

さらに、光産創大の学位は従来の大学にない博士（光産業創成）という学位であり、教員は開学からこの学位の取得基準についても考えなければならなかった。この学位について議論する過程も学内の教員が一体となった要因であると考えられる。学位（光産業創成）について教授 F は次のように述べている。

光産業創成大の学位っていうのが他とは違うんだけど、みんなが他とは違うと思っているだけで先生ごとにばらばらだと、あの一まあねえどこの研究室に属するかでだいぶ変わっちゃいますっていうのも困るので、学位を出すっていう意味でも全員が見て

いてある程度こういう方向にいきましょうっていうのを全員で、教員が共有できるようにっていうのもあって、えっと全体全教員のテーマを、あ全学生のテーマを大体教員が知っているっていう形が今みたいに出来上がってきてて、なので全学生が何やってるかを大体把握してるので、なんか協力できることがあればっていうのは考えやすいですね。

光産業創成の学位って話さなくてわかる？というのをだから最初に作らなきゃいけない。結局、そうするとそれを勝手に各先生が考えてっていうんじゃなくてやっぱり教務委員会のほうで基準を作りながら、基準はもちろんあったんだけどね。別にそういう、なんていうんだろ。文章にはならないけどみんなの意思統一を図れるようなこういうことが書かれていてこういうことをするのが光産業創成の研究で、そういう方向で、幅はあるよね、みんな、見てもわかるように、でもなんとなくなんかまあ言うのは難しいけど少し統一感みたいなものもある。ああいうのをだから作ってくるプロセスでどうしても、まあそういうのをやったほうがいいだろうってことで、全員学位論文にもかかわって。

先生の研究を主体にやっていくんだったら話は簡単で、その先生はここにいる先生なんだからその先生の研究をやってうちの博士（光産業創成）の研究じゃないですっていうのはおかしく、それはおかしいでしょってなっちゃうんだけど、学生が持ってきてくるテーマだと、やっぱその中でどう光産業創成っていう中に研究がこう合ってくるかっていうのを、うん、考える必要がある。

教務委員会の中の先生が学位審査の手順っていうのを議論して、もう全員が思っているものが違ってたので、そこのすり合わせは結構大変だったのと、あと、えっと、経営の先生が一人当然入っててその議論にも経営の先生が入ってもらってたんで、そうするとあの理系の先生とはやっぱり違うんで、そこをどう同じようなどっちも通れるような基準、ねえ、基準に持っていきかかっていうところも、まあ悩んだ。

えっうちの大学って学位，なんだろう，ふつうは学術的な成果だけを評価すればいいんだけど，うちはその，なんだみんなに会社を作ったり，まあ作ってない人も事業実践をすることかっというのを言っているの，その評価を学位論文の中にどう入れるかっという議論も大変だったんだけど，通常そういうのは学位論文には入ってないし。

ぼくはだからあの，ずっと変わってきてると思っていて，で，学生一人が学位論文を出すたびに博士（光産業創成）っていうのはこういう，こういう学位なんですよっていうのがどんどんどんどん固まってきた，で，ある人がぼんと違うのを出せばその光産業創成の，えーっと博士っていうのはこういうのっていうのの領域が広がっていったりとかもするだろうし，ずっと変わり続けてるんだろうと僕は思ってる。なんかね，光産業創成の博士ってだから僕ははっきり捉えられていないというか，完全にここまでがなんとかっというの，そういう事例がでてきて，これはいいよね悪いよねっていうのを学内の教員で議論して，でもその結果出したからにはその論文は博士光産業創成の，ね，研究だっということになるわけだから，常にそうやって変わってたり広がっていったり，で，あるところがどんどんそういう論文が増えてくればそういうところがメインかなっていうのもどんどん出来上がってくるわけで，っていう風に思っているんだけど。

以上のように，研究者＝実務者 X の研究の「場」である光産創大は，博士（光産業創成）という誰もが形式だって定義できないものを，異なる環境に所属していた教員により形作るという開学時点のプロセスを経て現在に至っている。そして今なお学生の研究進捗や学位論文を題材にしながら博士（光産業創成）とは何かを議論し続けているのである。こういった大学の枠組みのため，教員間の密な連携や，研究室の垣根を超え大学一体となって成果を出し学生を教え育てるという風土が維持強化され，新参者が熟達者を柔軟に入れ替え新たな実践共同体を形成することも抵抗なく受け入れられたと考えられる。



こうした局部横断的な連携体制は、『産学官連携による共同研究強化のためのガイドライン』でも課題として提起されているように一般的な大学では成立しづらい。横断的な連携体制を加速させるために、産学連携本部といった本部機能を持たせ、企業と大学の研究室との個々のやり取りを原則回避し、本部機能が全てを取りまとめる方針も打ち出されているほどである。しかし、光産創大では本部機能といったものを敢えて設けなくとも自然に研究室間の横断的な連携が風土として身につけていることがわかる。さらに、オープンイノベーションの観点で見ると、大学内の教員が連携して知識や技術を出し新たなものを生み出すという点で、大学内というクローズな環境でもオープンイノベーションがなされているといえるのではないか。以上のように、研究者＝実務者 X の光産創大における産学連携を実践共同体論の枠組みで分析することにより、産学連携の課題と目される部局横断的な連携活動や、オープンイノベーションを成立させるための示唆を得ることができた。

### 3-6. まとめ

産学連携によるイノベーション創出の確度を高めるための手段を明らかにするために、研究者＝実務者 X が光産創大との産学連携による研究過程を、内部観測法を基に調査し実践共同体の枠組みで分析を行った。

産学連携がうまくいかなくなる原因の一つとして、研究中に生起する不測の課題が発生したときに、連携先である大学教員や研究室が保有する技術では解決できず研究がすすめられなくなる点が見て取れた。これに対し、不測の課題を解決するために必要な技術を考え、場合によっては連携先を柔軟に入れ替えながら進めることが確度を高める解の一つであることが分かった。これにより、「産」のニーズと「学」のシーズが連携開始時に完全に合致せずとも軌道修正ができ、成功に至る可能性を高めることができることが明らかとなった。また、実

実践共同体の枠組みで見ると、実践の行為者は単一の実践共同体のみに所属することで目的が達成できるとは限らない。実践の行為者の目的の達成という視点で見たときに、正統的周辺参加を果たした実践共同体の知識の習得のみで目的を達成できるかを考え、複数の実践共同体に参画したり、正統的周辺参加をする実践共同体を替えたり、実践の行為者が中心となって新たな実践共同体を形成することで目的を達成していくプロセスがあることが明らかとなった。実践の行為者の目的を達成のために新たな実践共同体を形成するという点がブローカーとは異なる行動と考えられる。

分析により明らかとなった実践的含意は以下である。

・研究者自身の行動

産学連携を実務者として推進する研究者の行動指針として重要な事は、研究の産業への出口を常に意識し研究のための研究に陥らないようにすることである。特に「産」の立場の研究者が産業上の出口や成果を常に意識し、研究を推進するための技術が現在所属している研究室の技術で足りているかを確認する必要がある。また、技術が不足するようであれば、柔軟に師事する熟達者を入れ替えながら推進する方針転換も視野に入れながら推進することが重要となる。

・研究の「場」

研究を行う「場」である大学として重要なのは、「学」という枠組みにおける目的を考え、研究室や教授個人の単体ではなく大学という枠においてどういう付加価値を出すべきかを教員全体で常に議論し更新していくことではないか。光産創大では、開学時に大学の目的を議論し具体化していくプロセスと、博士（光産業創成）という従来の概念にない学位の意味付けをするプロセスにおいて、教員間の議論が生まれた。また、多様な課題を持つ学生に対し解決策を示すために、教員間が出し合い協力する風土が生まれた。このように、大学という枠組みにおいて目指すべき姿を常に議論し続け、部局横断的に活動する行動が求められる。

### 第3章の参考文献

- [1] 原山優子, 日本における産学連携, RIETI Policy Discussion Paper Series 04 p.001, 2003
- [2] 澤田芳郎, 大学モデルと産学連携コンフリクト, 産学連携学, Vol.1, No.1, p.5-8, 2004
- [3] 藤川昇, 松井正之, 産学官連携による技術移転・事業化の実証的研究, 日本経営工学会論文誌, Vol.61, No.2, p.54-64, 2010
- [4] 正橋直哉, 大学における産学官連携の取り組み, まてりあ, Vol.58, No.8, p.427-432, 2019
- [5] 金井一頼, 地域における産学官連携の推進と「場」の機能, 竜谷大学経営学論集, Vol.44, No.3, p.1-12, 2004.
- [6] 安田聡子, 産学連携の全体像の探究: 公式および非公式経路から成る知識移転スペクトラム, 研究 技術 計画, Vol.36, No.3, p.290-307, 2021.
- [7] Lave, J., & Wenger, E., *Situated learning: Legitimate peripheral participation.*, Cambridge: Cambridge University Press, 1991. (佐伯胖 (訳) 『状況に埋め込まれた学習——正統的周辺参加——』産業図書,1993.)
- [8] R. McDermott & W. M. Snyder, *Cultivating Communities of Practice: A Guide to Managing Knowledge*, Boston: Harvard Business School Press, 2002. (櫻井祐子訳 『コミュニティ・オブ・プラクティス—ナレッジ社会の新たな知識形態の実践—』翔泳社, 2002)
- [9] Star, S.L. and J.R. Griesemer, *Institutional Ecology, 'Translations' and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39*, *Social Studies of Science*, Vol.19, p.38-47, 1989.
- [10] Gherardi, S., and Nicolini, D., *Learning in a constellation of interconnected practices: Canon or dissonance?*, *Journal of Management Studies*, Vol.39, p.419-436, 2002.
- [11] Wenger, E., *Communities of Practice: Learning, Meaning and Identity*, Cambridge University Press, p.114, 1998.
- [12] P. R. Carlile, *A Pragmatic View of Knowledge and Boundaries: Boundary Objects in New Product Development*, *Organization science*, Vol. 13, No. 4, p. 442-455, 2002.
- [13] 松本雄一, 陶磁器産地における実践共同体の形成と技能の学習, 日本認知学会 第28回大会発表論文集, 657, 2010.

- [14] 森下桂嗣, 増田靖, 実践に潜在する物語と戦略が創発する「語り」: 新規事業開発における市場調査の現場事例研究, 経営戦略研究, Vol. 18, p.3-29, 2018.
- [15] Gold, R. L., *Roles in sociological field observations.*, *Social Forces*, Vol.36, No.3, p. 217-223, 1958.
- [16] Junker, B. H., *Field work: An introduction to the social sciences. Chicago, IL, University of Chicago Press*, 1960.
- [17] 郡司ベギオ - 幸夫, 生命理論, 哲学書房, 2006.
- [18] 増田靖, 動機づけマネジメントにおける『語り』の有効性——観測志向型理論に定位した現場研究=マネジメント実践の方法論——, 経済科学論究, Vol. 4, p.39-51, 2007.
- [19] 増田靖, 生の現場の「語り」と動機の詩学——観測志向型理論に定位した現場研究=動機づけマネジメントの方法論——, ひつじ書房, 2013.
- [20] 武田信秀, 増田靖, 中小企業を進化させるための経営者教育に関する一考察——光産業創成大学院大学における内部観測的実践を通して——, 政策科学学会年報, Vol.5, p. 63-77, 2015.
- [21] 藤原弘康・増田靖, イノベーションの芽を摘まない技術開発実践の方法論——創発的ビジネスフィールドリサーチによる事例研究——, 経営情報学会誌, Vol.24, No.3, p.169-195, 2015.

## 第4章 結論

筆者のミッションは、成長著しいレーザー加工技術の産業発展に貢献するために、産学連携を推進しながらレーザーアブレーション過程を中心とした加工プロセスに踏み込んだ新たな技術を開発し、レーザー加工技術の発展ならびに自動車産業をはじめとした産業発展に貢献することである。

本章では、本研究の目的と研究内容、及びその結果について4-1でまとめ、4-2で結論を示す。さらに4-3で本研究の光産業創成における意義と今後の課題及び展望について述べる(4-3)。

### 4-1. 研究目的と結果

#### 4-1-1. 本研究の目的

- ①超短パルスレーザー加工における加工中に発生するプルームの定量可視化技術の開発及び加工能率向上を実現する技術的指針の獲得
- ②産学連携を成功に導く仕組みやその特徴を明らかにすること

#### 4-1-2. 方法

- ① プルームの定量可視化及び加工能率向上に対し以下の技術的研究と開発を行った。
  - ・ プルーム定量可視化技術の開発
  - ・ 可視化技術を用いたプルーム挙動の可視化と加工への影響定量化
  - ・ 加工能率向上を実現する方針検討と、効果検証

- ② 産学連携を成功に導く方針を獲得するために以下の研究を行った。
- ・ 企業に所属する筆者＝研究者が光産創大と産学連携を推進した過程に関し内部観測法を用い調査
  - ・ 実践共同体論の枠組みでの考察

### 4-1-3. 本研究の結果

- ① 超短パルスレーザー加工の加工能率向上を実現するため、加工中に発生するplumeが加工を阻害する仮説を立て、これを立証するためにこれまで可視化が困難であった超短パルスレーザー加工中のplume可視化を検討した。SUS430の素材に対し、波長1030nm、パルス幅10psのレーザーで加工を行った時のplumeの屈折率と吸収係数を定量的に可視化する方針のもと、偏光高速度干渉法を活用し、直径1.5mmの空間に対し、時間分解能5 $\mu$ sでplumeの挙動を可視化でき、plumeの屈折率および吸収率を定量的に評価ができる観察システムを具現化した。

この可視化装置を用いることにより、これまで明らかになっていなかったレーザー照射後にplumeが成長し加工点から離散していく様子を鮮明に捉えることに成功した。この結果から、plumeはレーザーが照射されてから20 $\mu$ s後も加工点周辺に残存し、次のレーザー照射に影響を与えることが初めて明らかになった。

実製品加工時におけるplumeの加工への影響を明らかにするために、レーザー走査時を前提とした高繰返し条件での連続照射時におけるplumeの挙動と加工への影響を評価した。レーザーを走査させた時レーザーは10回以上重なりながら加工が進展するため、レーザーの繰返し周波数が50kHzで10回照射した時のplumeの挙動及び影響度を評価した。その結果、連続的にレーザーを照射した場合、ワークから直角方向にplumeが噴出し続け、10回

照射した場合、プルームはレーザーの投入を 34%阻害することが明らかとなった。さらに、溝加工などの狭隘空間にレーザーを照射した場合、加工面から直角方向に噴出し、対向壁にぶつかることで噴出が遮られ、その分屈折率が高くなり加工能率も低下することが分かった。

以上の分析結果から、加工能率を向上させるためには、プルームとレーザー光の干渉を回避することが有効であると考え、その一手段として加工面にレーザーを斜入射する方法を検討した。その結果、プルームの干渉を回避するために加工面に対しレーザーを 30 度以上傾けて照射することでプルームによる能率低下を防ぐことができることが分かった。

- ② 産学連携を成功に導く仕組みやその特徴を明らかにするために、研究者＝実務者 X が光産創大との産学連携による研究過程を、内部観測法を基に調査し、実践共同体の枠組みで分析を行った。

産学連携がうまくいなくなる原因の一つとして、研究中に生起する不測の課題が発生したときに、連携先である大学教員や研究室が保有する技術では解決できず研究がすすめられなくなる点が挙げられる。これに対し、産学連携を推進している成員は、不測の課題を解決するために必要な技術を考え、場合によっては連携先を柔軟に入れ替えながら進めることが、確度を高める解の一つであることが分かった。また、このような一般的な大学ではなし得ない行為が光産創大でできた理由は、光産創大が存在目的や大学という単位でいかに産業に貢献できるかということ、開学時から今に至るまで継続的に議論し教員が一丸となって取り組む風土が形成されているからと考えられる。

また、実践共同体の枠組みで見ると、実践の行為者は単一の実践共同体のみに所属することで自身の目的が達成できるとは限らない。実践の行為者の目的の達成という視点で見たときに、正統的周辺参加を果たした実践共同体

の知識の習得のみで目的を達成できるかを考え、複数の実践共同体に参画したり、正統的周辺参加をする実践共同体を替えたり、実践の行為者が中心となって新たな実践共同体を形成することで目的を達成していくプロセスがあることが明らかとなった。実践の行為者の目的を達成のために新たな実践共同体を形成するという点がブローカーとは異なる行動と考えられる。

## 4-2. 結論

自動車部品の性能を左右する微細加工の主要手段であるレーザ加工技術の加工能率向上による産業発展というミッションに対し、本研究では、加工プロセスを定量的に可視化できる装置を開発し加工能率向上を実現する技術的な指針を獲得するとともに、確度高く産学連携に導く手法を導いた。

- ① 超短パルスレーザ加工におけるブルームを可視化する手法として偏光高速干渉法を活用した新たな可視化技術を実用化し、これまで不可能であったブルームの屈折率及び吸収率を定量的に求めることができた。SUS430のワークに波長 1030 nm, パルス幅 10 ps, 1 パルス当たりのエネルギー 180  $\mu$ J のレーザを投入する条件において、レーザをワーク面に対し 25° 以上傾けることで加工能率を 1.28 倍向上できることを実証し、レーザとブルームの干渉を回避することが加工能率向上に有効であることを示した。本手法を筆者の企業内のレーザ加工工程に適用していくことで、産業への展開を行っていく。
- ② 産学連携を確度高く成功に導くためには、研究中に生起する不測の課題に対し、不測の課題を解決するために必要な技術を考え、場合によっては連携先を柔軟に入れ替えながら進めることが成功の確度を高める解の一つであることが分かった。そのために、産学連携を推進する研究者、特に「産」に属する成員は、研究の産業への出口を常に意識し研究を進めるための技術が連



携先の「学」にあるかを確認するとともに、技術が不足するようであれば、柔軟に師事する熟達者を入れ替えながら推進することが重要となる。また、研究を行う「場」である大学として重要な事は、研究室や教授個人の単位ではなく、大学という枠においてどういう付加価値を出すべきかを教員全体で常に議論し更新していくことであると考え、光産創大では一般の大学と異なるコンセプトに基づきどう発展させていくかを開学時から脈々と教員間で議論し続けられている。これにより産学連携を成功に導くための「場」が醸成できていることが、分かった。

### 4-3. 光産業創成における本研究の意義

微細加工技術の中で最もポテンシャルがあり、技術発展も著しい超短パルスレーザー加工技術は、発振器の高出力化が進む一方で、加工プロセスの理解や、プロセスに基づいたレーザーのポテンシャルを発揮できる手段の開発が追いついていない状況であった。それに対し、本研究によって、加工プロセスを可視化し加工への阻害を定量化できる手法を実用化できた。本手法を広め研究開発をさらに進めれば、レーザー加工プロセスの理解がさらに深まり、レーザーのポテンシャルを引き出せる技術の開発ができるであろう。さらに、本研究では、レーザーとプラズマの干渉を回避すれば、加工能率を向上できるという指針も獲得した。この手法を用いれば、レーザー加工の低コスト化につながるためレーザー加工の適用がさらに広がるであろう。このように、本研究により、レーザー加工における加工プロセス可視化手法と加工能率向上の指針を獲得できたことにより、レーザー加工技術の産業利用を広げ、継続的な加工技術の開発に貢献できる。この点において、本研究は光産業創成に貢献するものである。

また、研究の推進プロセスに関して、企業単独での技術開発に限界を迎えた現在では、企業の枠にとらわれず外部の技術者や組織と共創することが求められるようになったが、未だ確実に成功に導く手段は確立されていない。それに対し、筆者が、所属企業と光産創大との産学連携を推進して得た成功事例を分析することで、研究者自身の行動や研究の場についての実践的含意を獲得することができた。特に、「産」に所属する研究者は、研究中に生起する不測の課題に対し、常に産業への出口を意識すると同時に課題解決に必要な知識や技術を考え、既存の関係に捉われず時には柔軟に師事する熟達者を入れ替えながら推進することが重要であることが明らかとなった。また、研究を行う「場」に関しては、研究室や教授個人の単位ではなく大学という枠において付加価値がだせるよう、教員間で議論、連携をすることでイノベーションが起きやすい「場」にすることが重要であることが分かった。外部の技術者との共創が不可欠な光産業において、本研究の事例や実践的含意を用いれば外部との共創の確度が高まり新技術が開発できることで、光産業は発展していくであろう。この点においても、本研究は光産業創成に貢献するものである。

#### 4-4. 今後の課題と展望

本研究では自動車部品で主に用いられる素材や形状、加工条件についてプルームの挙動を定量的に評価し、能率向上の指針を明らかにした。今後の研究課題は、他の素材や形状、加工条件についてプルームの挙動を明らかにし加工能率向上の指針を明らかにすることが挙げられる。これらの課題については、本研究で実用化したプルームを可視化する手段を用いれば検証が可能であり、レーザ加工プロセス自体の理解が深まるとともに、本研究で示したような能率向上を実現する新技術につながる可能性があるため、光産業の発展という意味でも今後

の検証が期待される。また、本研究で実用化した偏光高速度干渉法を活用した可視化手段における結果について、本研究では加工阻害に特化し分析を行ってきたが、本手法を用いれば、プルームの形状や分布を3次元的に表現したり、プルームの組成、例えば金属蒸気やデブリなどの内訳を求めることもできる可能性がある。これについては、本手法の更なる発展が期待される。

産学連携を成功に導く事例研究については、内部観測法を用いて産学連携を成功に導く一つの事例と実践的含意を示した。しかし、本研究のみで産学連携を確実に導くことはできないため、本研究により明らかになった結果に基づき他の事例も調査分析することにより、更なる実践的含意を獲得し、産学連携の確度を高める必要がある。本研究で用いた内部観測法を用いれば実践における詳細の情報を獲得できるため、更なる研究の発展が期待される。また、本事例を実践共同体論の枠組みで分析すると、研究者=実務者 X はブローカーとは異なる行動をとっていることが示唆されたが、それ以上の考察や実践共同体論自体の拡張にまでは踏み込めなかった点については課題が残る。本事例に基づいて分析を進めれば、実践共同体論の拡張の可能性を秘めているため、本事例の意義は大きいと考える。

以上のことから、本研究を通して得られた可視化技術および能率向上の指針を活かし、競争力の高い加工技術を具現化するとともに、産学連携をはじめとした社外連携によるイノベーションを推進することで、レーザ加工技術ならびに光産業を創成していきたい。

## 研究業績

### ・主論文

安田浩一郎，高木亮汰，石井勝弘，藤田和久，白井秀彰，坪井昭彦：

“High-Speed Imaging of a Laser Ablation Process Using Parallel Phase-Shifting Interferometry”

Journal of Laser Micro Nanoengineering, 14.3(2019): P.220-225

### ・学会発表

安田浩一郎，高木亮汰，石井勝弘，藤田和久，白井秀彰，坪井昭彦：

「超短パルスレーザーによる金属加工プロセスの現象可視化」

一般社団法人レーザー加工学会 2018 年第 89 回講演会

(大阪大学 銀杏会館，2018 年 5 月 24 日)

安田浩一郎，高木亮汰，石井勝弘，藤田和久，白井秀彰，坪井昭彦：

「偏光高速度干渉法を用いた超短パルスレーザー加工噴出物可視化」

一般社団法人応用物理学会・光波センシング技術研究会第 61 回光波センシング技術研究会講演会

(東京理科大学 神楽坂キャンパス，2018 年 6 月 12 日)

安田浩一郎，高木亮汰，石井勝弘，藤田和久，白井秀彰，坪井昭彦：

“High-speed imaging of laser ablation process using parallel phase-shifting interferometry”

The 8th International Congress on Laser Advanced Materials Processing

(広島国際会議場，2019 年 5 月 22 日)

安田浩一郎，増田靖

「産学連携におけるイノベーション創出を促進する実践共同体の特徴」

一般社団法人日本情報経営学会第 80 回大会

(拓殖大学 文京キャンパス，2020 年 7 月 3 日)

# 謝辞

本研究の遂行および、論文執筆にあたり、暖かいご指導ご鞭撻をいただいた光産業創成大学院大学 藤田和久先生に心から感謝申し上げます。藤田先生には研究方針や具体的な実験方法、学会発表や論文作成方法の細部まで丁寧にご指導いただき、研究についての基礎を与えてくださり、加えて研究や事業実践の楽しさ、面白さを教えてくださいました。これらの経験を活かしてこれからも新たな研究開発に邁進して参ります。

光産業創成大学院大学への入学のきっかけを与えてくださり、研究者としてまた社会人としてご指導くださいました、光産業創成大学院大学 坪井昭彦先生に深く感謝申し上げます。坪井先生には、大学の入学の後押しをしてくださり、これにより私の人生が大きく開けたと感じております。また企業、社会人の先輩として研究視点と産業視点の双方の重要性について公私ともに時間を割いて多大なるご指導をいただきました。今後、坪井先生に少しでも近づくことができるよう精進してまいります。

偏光高速度干渉法というレーザ加工プロセスの可視化では初となる可視化手法を具現化するのにあたり、多大なるご指導をいただきました、光産業創成大学院大学 石井勝弘先生に深く感謝申し上げます。最初は廊下でのお声がけから始まったにも関わらず研究のご指導を快諾いただき、学術的な知識だけでなく、光学調整をはじめとしたノウハウも親身になって教えていただいたことで、そこから私の研究の道が開けました。新たな技術に触れたときの刺激を忘れないだけでなく、後進に伝えながら研究開発に貢献してまいります。

光産業創成大学院大学 増田靖先生は、実践共同体論を枠組みとした産学連携の推進方法について、熱心にご指導いただきました。深く感謝申し上げます。特に学術的なご教授だけでなく、業務上の体験を学術的な視点に昇華させる示唆

を下さりました。業務プロセスの観点で勘と経験だけでなく学術的な要素も意識しながら事業開発や社をまたいだ連携まで広げ進めていきたいと思います。

光産業創成大学院大学 瀧口義浩先生に深く感謝申し上げます。瀧口先生には研究の面白さ、前向きにとことん進めることの重要性を教えてくださいました。先生の温かいお声がけやご指導がなければ研究の推進や本論文の作成まで至ることはできませんでした。

分野ゼミでは長谷川和男先生、沖原伸一郎先生、楠本利行先生、森清和先生、から、本研究の遂行にあたり、多くのご指導をいただきましたことを感謝申し上げます。実験室で起こる不測の結果に対しても現場でともに考え解決策を導いてくださり、ありがとうございました。

光産業創成大学院大学に進学する機会を与えてくださった、森田浩充氏、杉浦慎也氏、田中稔氏、山口哲司氏、白井秀彰氏、都外川真志氏に感謝いたします。特に山口哲司氏、白井秀彰氏には研究と業務との並行推進にご理解いただき、学会のご指導や研究の進め方のご相談など多大なるご指導、ご助言を頂きました。深く感謝申し上げます。

光産業創成大学院大学で実験を共に推進した高木亮汰氏に深く感謝いたします。高木氏の尽力なくしては研究は成功しえませんでした。研究の苦楽を共にし、一緒に最後まで研究をやりぬけたことはかけがえのない思い出です。ありがとう。

光産業創成大学院大学における様々なご支援をいただきました、石山貴之様、加藤奈穂様、村田浩二様、菅沼聖子様、鈴木朝子様、森秋子様に心から感謝いたします。いつも暖かく声をかけて応援して下さりありがとうございました。

光産業創成大学院大学の講義やゼミで共に学んだ同期入学の石原健二様、伊藤正樹様、舟山博人様、稲村大樹様、山内秀恭様他、光産業創成大学院大学の所属の学生の方々に心から感謝いたします。様々な年齢層、経営層の方々と出会え同じ時間をともにできたことがとても刺激になりました。

最後に、大学への入学を応援してくれ、暖かく見守りサポートしてくれた妻  
宏恵、いつも明るい笑顔で応援してくれた、長女 羽来、次女 葵子、長男 旭希、  
三女 永依に深く感謝します。ありがとう。

2022年2月 安田浩一郎