

博士論文

超短パルスレーザーを用いた
ダイヤモンド工具成形技術に関する研究
～下請け企業から研究開発型企业への成長戦略～

2019年9月

光産業創成大学院大学

光産業創成研究科

内山文宏

博士論文要旨

内山文宏

超短パルスレーザーを用いたダイヤモンド工具成形技術に関する研究 ～下請け企業から研究開発型企业への成長戦略～

本論文は、超短パルスレーザーを用いた新たなダイヤモンド工具成形技術を開発することにより切削技術の向上を図ることについて論じている。また、小規模企業が新規事業を起し、下請け企業から研究開発型企业へ成長するための戦略について論じている。

超短パルスレーザーを用いてダイヤモンド焼結体 (Poly Crystalline Diamond: 以下 PCD と記す) 工具を成形する技術の研究開発について述べる。

切削加工は、産業を支える加工技術として重要な役割を担っている。切削加工とは、工作機械に切削工具を取り付け、材料の不要な部分を切りくずとして除去することで、所望の形状や寸法に加工する方法である。切削加工の性能は切削工具の性能に大きく依存する。切削される材料は、市場ニーズに対応して、難削化・複合化といった高度化が進んでいる。これに対応できる切削工具には、小径化、形状の微細化・複雑化、多数枚刃化等などの高度な工具成形技術が要求される。切削工具のうち PCD 工具は、アルミニウム等の自動車部品やアクリル等の情報端末部品等の切削加工において、需要が増加している。PCD の材料であるダイヤモンドは、地球上でもっとも硬い物質であり、究極の工業材料として知られている。しかしながら、その硬さ故、PCD 工具を成形する従来技術である放電加工や砥石研削では、精度や形状に限界がある。よって、PCD 工具が高度化するためには、新たな工具成形技術の開発がカギとなる。

そこでレーザー加工技術を用いた新たな工具成形技術を開発した。超短パルスレーザーによる微細加工技術に注目し、工具成形機の開発と最適な照射条件を導出することで、微細な工具形状の成形と、鋭利な刃先の創成を実現した。刃先の鋭利性を示す刃先丸みは、従来技術では $1.3\mu\text{m}$ である。切削性を考慮して目標は $1\mu\text{m}$ 以下と設定した。その結果、UV ピコ秒レーザーを用いることにより $0.72\mu\text{m}$ を実現した。

超短パルスレーザーを用いたダイヤモンド工具成形技術を応用し、全体厚 0.55mm のガラス樹脂積層材を切削できる PCD 工具と、軟質樹脂を切削できるチップブレード付 PCD 工具の開発に成功した。また、ストラクチャ付工具による加工面粗さ制御技術を確立した。この技術により、切削条件の変更のみで数 μm から数十 μm の範囲で加工面粗さの制御が可能となった。

次に、小規模企業が新規事業を起こし、下請け企業から研究開発型企业へ成長するための戦略について述べる。

中小企業が新規事業を起こし高度化を図ることが、我が国経済にとって重要である。第5期科学技術基本計画によれば、技術シーズを短期間で新規事業につなげるようなイノベーションの創出は、市場規模の制約があり意思決定に時間を要する大企業よりも、迅速かつ小回りの利く中小・ベンチャー企業との親和性が高い。中小企業白書によれば、中小企業は自ら需要を獲得する必要に迫られている。従来、受託加工を事業としてきた中小企業・小規模事業者は、大企業が市場から獲得してきた需要の恩恵を享受してきた。しかし、グローバル化の進展等を背景に、相互依存関係は希薄化し、中小企業・小規模事業者は自ら市場と向き合い、需要を獲得する必要に迫られている。また、同白書は中小企業が高度化を図ることが我が国製造業の国際競争力向上に資すると指摘している。

しかし、中小企業は新規事業を起こすにはどうしたら良いかわからないことが問題である。中小企業が新規事業を立ち上げるために、何が重要で、どのような方向性を必要とするか、が求められている。中規模企業に比べ経営リソースの乏しい小規模企業では、さらにその傾向は顕著である。

そこで6年間の事業実践を通じ、小規模企業が新規事業を起こすには何が必要で、何が重要であったかを観察することで、小規模企業が新規事業を起こす際に、ヒントになる方向性を示すことを目的としている。

その結果、小規模企業が新規事業を起こし、下請け企業から研究開発型企业へ成長するためには、次の3点が重要であることがわかった。それらは、産と学が互いの成果を意識した産学連携、川下企業との連携を意識した補助金による資金調達、国の施策との整合性を意識することの3点である。

以上のように本論文は、超短パルスレーザーを用いた新たなダイヤモンド工具成形技術を開発することにより切削技術の向上を図ることについて論じた。また、小規模企業が新規事業を起こし、下請け企業から研究開発型企业へ成長するための戦略について論じた。本研究の成果は小規模企業の成長と、切削技術の発展を促し、日本のものづくりの発展と国際競争力の向上に寄与するものである。

Abstract

Diamond tool forming technology using ultrashort pulse laser and growth strategy from subcontracting company to an R & D company

This doctoral thesis describes improvement of cutting technology by developing diamond tools forming technology using an ultrashort pulse laser. This study also discusses the strategies of growing from a subcontracting company into a research and development (R&D) company by a small-scale company forming a start-up business.

First, the development of poly crystalline diamond (PCD) tool-forming technologies is described.

The cutting process is an important technology in the manufacturing industry; in this process, unnecessary parts of material are removed as chips using machining tools to form the desired shape and size. The cutting performance is highly dependent on the cutting tool performance, such as its shape. In recent times, advanced materials such as hard-to-cut and composite materials have been developed to meet market requirements. Advanced tool forming technologies such as diameter reduction, fine shape, and multiple cutting edges are required to cut these materials. A PCD tool is one of the highly in-demand cutting tools used for cutting several materials such as aluminum using automotive parts and acrylic resin using information terminal parts. Diamond, which is the main material of PCD, is the hardest material on earth and is known as the ultimate industrial material. However, forming complicated tool edges of PCD using former technologies such as electric discharge machining and whetstone grinding is challenging because of its hardness. Therefore, the advancement of the PCD tool means the development of new tool forming technology.

A new tool forming technology using laser processing technology was developed herein. Several laser processing conditions such as wavelength and time-domain pulse width were optimized. The results clearly demonstrated that the ultrashort pulse laser processing with the UV region wavelength was efficient for the fine structure formation of PCD. For example, the sharpness of the PCD blade formed using laser and former technologies was 0.72 and 1.3 μm , respectively.

A new PCD tool for glass resin laminate of a 0.55 μm thickness was developed using the proposed tool forming technology. That with a fine chip breaker for soft resin was also developed. Furthermore, control technology for surface roughness using fine-structured tools

was developed via experimental and simulation methods.

Next, this thesis also describes strategies for small businesses to launch new businesses and grow from a subcontracting company to an R&D company.

SME growth is important for Japan's economy. SMEs represent 99.7% of the number of Japanese companies out of which small companies comprise 85%. The Fifth Science and Technology Basic Plan states the following: the creation of innovations that connect technology seeds to new businesses in a short period of time is more appropriate for small- and medium-sized companies that are quick and easy-to-use rather than large companies that require time to make decisions. The SME White Paper states as follows: SMEs need to get their own demand. In the past, SMEs and small businesses that used contract processing as their business have benefited from the demand that large companies have acquired from the market.

However, with the advancement of globalization, the relationship of interdependence between large enterprises and SMEs/micro-businesses have decreased, so that SMEs and micro-businesses are left to face the market and acquire demand by themselves. The advancement of SMEs contributes to the improvement of the international competitiveness of the Japanese manufacturing industry.

However, the problem is that SMEs are not aware of ways to start new businesses. Knowing what is important and what kind of direction is required are a must for SMEs to launch new businesses. This tendency is even more pronounced in small companies with fewer management resources than medium-sized companies.

I did business for six years. I examined what is important for small businesses to start new businesses. Another purpose of this thesis is to provide ideas for small businesses to succeed in new business.

The following three points are important for small businesses to start new businesses: industry and academia collaborate with each other with an awareness of each other's achievements; SMEs apply for subsidies in collaboration with downstream companies; and the development theme matches the national policy.

In this thesis, a new tool forming technology by applying laser technology was developed for the formation of cutting tools. New cutting tools for specific materials using the developed forming technology and new cutting technology for surface roughness control were developed. A small company launched a new business. We practiced from the growth from a subcontractor company to an R&D company. By learning the process, we demonstrated the direction for small-scale companies to grow into development-type companies. Our results

would contribute to the growth of small-scale companies and promote the development of new cutting technology. In addition, these will contribute to the development of Japanese manufacturing industries and the improvement of its international competitiveness.

目次

第1章 はじめに.....	1
1-1 背景.....	1
1-1-1 素材産業.....	1
1-1-2 切削加工.....	2
1-2 研究の課題.....	2
1-3 研究の目的.....	3
1-4 本論文の構成.....	4
第1章.....	6
第2章 PCD 工具を成形するためのレーザ加工技術の開発.....	7
2-1 PCD 工具成形技術.....	7
2-1-1 背景.....	7
2-1-2 目的.....	10
2-1-3 レーザ発振器適性調査実験の方法と結果.....	11
2-1-4 レーザ波長適性調査実験の方法と結果.....	12
2-1-5 超短パルスレーザを搭載した工具成形機の開発.....	13
2-1-6 レーザ照射条件設定における反射率の測定.....	14
2-1-7 レーザ照射条件設定における除去効率と表面粗さの測定.....	15
2-1-8 レーザ照射条件設定における変質層の測定.....	19
2-1-9 考察.....	20
2-2 PCD 工具刃先創成技術.....	21
2-2-1 背景.....	21
2-2-2 目的.....	21
2-2-3 工具刃先創成における表面粗さ, 刃先丸みの確認実験.....	22
2-2-4 工具刃先創成におけるダイヤモンド粒径の影響.....	23
2-2-5 工具刃先創成における波長の影響.....	24
2-2-6 考察.....	24
2-3 まとめ.....	25
第2章の参考文献.....	26
第3章 ガラス樹脂積層材用PCD 工具の開発.....	28
3-1 背景.....	28

3-2 目的.....	29
3-3 方法.....	30
3-4 結果.....	30
3-4-1 切りくず排出性を考慮した設計.....	30
3-4-2 ガラス層切削用最小切れ刃数のシミュレーション結果.....	32
3-4-3 開発工具の切削特性.....	34
3-5 考察.....	35
3-6 まとめ.....	36
第3章の参考文献.....	37
第4章 軟質樹脂用PCD工具の開発.....	38
4-1 背景.....	38
4-2 目的.....	39
4-3 方法.....	40
4-4 結果.....	40
4-5 考察.....	44
4-6 まとめ.....	44
第4章の参考文献.....	45
第5章 ストラクチャ付工具による加工面粗さ制御技術の開発.....	46
5-1 背景.....	46
5-2 目的.....	48
5-3 方法.....	48
5-3-1 レーザ加工によるストラクチャ付工具の成形.....	48
5-3-2 仕上げ加工面プロファイルモデル.....	49
5-3-3 ストラクチャ付工具によるフライス加工における回転軸傾斜の影響.....	50
5-3-4 表面形状の解析モデル.....	51
5-4 結果.....	52
5-4-1 表面形状シミュレーションの結果.....	52
5-4-2 切削試験の結果.....	54
5-4-3 仕上げ面プロファイルの比較結果.....	54
5-5 最大高さ粗さマップによる検討.....	57
5-6 考察.....	60
5-7 まとめ.....	60
第5章の参考文献.....	61

第6章 小規模企業が新規事業を起こすための考察.....	63
6-1 背景 -中小企業白書・科学技術基本計画-	63
6-2 目的.....	65
6-3 小規模企業による新規事業実践.....	66
6-3-1 産学連携構築の内容.....	66
6-3-2 事業実践の一覧.....	68
6-3-3 事業実践における成果の詳細.....	72
6-3-4 新規事業を起こすための検討.....	87
6-4 考察.....	89
6-4-1 産学連携による新規事業実践.....	89
6-4-2 実践的なビジネス手法との比較.....	90
6-4-3 中小企業白書・科学技術基本計画への貢献.....	91
6-5 まとめ.....	92
第6章の参考文献.....	93
第7章 本論文のまとめと今後の課題.....	94
7-1 総括.....	94
7-2 今後の課題.....	97
7-3 おわりに.....	97
図表一覧.....	98
謝辞.....	102
業績目録.....	104

第1章 はじめに

1-1 背景

1-1-1 素材産業

素材産業は我が国の重要な産業の一つである。日本の技術力の真の強みは重工業と素材・部品にあると言われている [1]。平成 26 年経済産業省工業統計調査 [2] によれば、「素材産業」の製造品出荷額は 48.9 兆円となる (Table1-1)。ここでは「素材産業」とは、日本標準産業分類における「パルプ・紙・紙加工品」、「化学工業」、「プラスチック製品」、「ゴム製品」の 4 つの産業を合わせたものとする。「素材産業」は製造業全体の 16% を占め、我が国のリーディングインダストリーの一つである [3]。

Table1-1 製造業における素材産業の位置づけ
引用 平成 26 年 経済産業省 工業統計調査

産業 (日本標準産業分類)		製造品出荷額 (兆円)		割合 (%)
製造業計		298.3		100
素材産業	パルプ・紙・紙加工品	48.9	6.8	16
	化学工業		27.9	
	プラスチック製品		11.1	
	ゴム製品		3.1	

一方、同じく平成 26 年経済産業省工業統計調査より、日本標準産業分類における「輸送用機械器具」と「情報通信機械器具」の製造品出荷額はそれぞれ 59.8 兆円と 8.6 兆円である。それぞれ製造業全体の 20% と 3% を占め、今後も成長が期待される産業である。

Table1-2 製造業における情報通信機械器具と輸送用機械器具の位置づけ
引用 平成 26 年 経済産業省 工業統計調査

産業 (日本標準産業分類)	製造品出荷額 (兆円)	割合 (%)
製造業計	298.3	100
輸送用機械器具	59.8	20
情報通信機械器具	8.6	3

1-1-2 切削加工

切削加工は産業を支える加工技術として重要な役割を担っている。「素材産業」における素材は加工技術により形を変えることで、「輸送用機械器具」や「情報通信機械器具」の産業において部品や製品が製造されている。例えば、アルミニウム（素材）を切削加工（加工技術）することで、自動車用エンジン部品が製造されている。また、樹脂（素材）を切削加工（加工技術）することで携帯情報端末の筐体や表示板（部品）が製造される。このように、「輸送用機械器具」や「情報通信機械器具」、「素材産業」において加工技術は産業を支える技術として重要な役割を担っている。

しかし、加工技術は日本標準産業分類にも項目が無いように、「輸送用機械器具」や「情報通信機械器具」、「素材産業」に比べて注目されていない。これらの産業の強みを生かすためには、新素材を生み出し続けることが必須であり、それに伴った加工技術の向上も必須である。よって、新たな加工技術の検討が必要である。

加工技術には、Table1-3のように casting, 塑性加工, 粉末冶金, 溶接, 切削加工, 研削加工がある [4].

Table1-3 加工技術の分類と加工原理

引用 日本機械学会, 機械実用便覧, 丸善, p.626, 1971. より一部編集

加工技術	加工原理
鋳造	素材の溶融・凝固
塑性変形	素材の塑性変形
粉末冶金	圧粉素材の変形, 拡散, 金属結合
溶接	素材の局部的溶融・凝固, 素材間の変形, 拡散, 金属結合
切削加工	素材の不要部分の刃物による排除
研削加工	素地あての不要部分の砥石による排除

加工技術の一つである切削加工は、工作機械と切削工具を使用して、工作物の不要な部分を切りくずとして除去し、所望の形状や寸法に加工する方法である [5]. 切削加工の技術・産業は我が国にとって最も重要な技術・産業の一つであり、発展し継承され続けなければならない [6].

1-2 研究の課題

材料の高度化に切削技術が対応するためには、新たな工具成形技術の開発が課題である。

複合化, 難削化等の材料の高度化にともない, 材料の加工性がますます困難になっている。そのため, 加工技術の高度化が求められ, 新たな切削工具の開発が重要になってきている [7]。新たな切削工具を開発するためには, 新たな工具成形技術の開発が重要である。工具成形技術とは, 工具の刃先に任意の形状と鋭利な刃を成形する技術である。

従来の工具成形技術として, 過去に砥石研削や放電加工の技術が研究されてきた [8] [9] [10]。しかし, 砥石研削では砥石, 放電加工では電極の形状により, 成形できる工具形状が依存するため, 形状や精度に限界がある。最近ではレーザー加工技術を用いた工具成形技術が研究されている [11] [12] [13] [14] が, 鋭利な刃先が得られない等, 性能に課題がある。以上のように, 新たな切削工具を開発するためには, 新たな工具成形技術を開発することが重要である。

新たな切削工具の開発には, 工具メーカーの工具開発力をさらに向上させる必要がある。切削加工には, 切削業者, 素材メーカー, 機械メーカー, 工具メーカーの4者が関係している。しかし, 切削業者, 素材メーカー, 機械メーカーの3者は工具を製造・開発できない。そのため, 工具開発は工具メーカーが進める必要がある。

工具開発を進めるにあたっては, 迅速な開発と高い技術力が必要である。一般に大手・中規模の工具メーカーでは工具開発期間, 製造期間が長く掛かってしまう。小規模工具メーカーでは納期は早いですが工具開発できる技術力に課題がある。よって, 小規模工具メーカーが短納期の特長を生かし, 工具開発できる技術力を有するようになることが求められている。

1-3 研究の目的

本論文の第1の目的は超短パルスレーザーを用いた新たなダイヤモンド工具成形技術を開発することにより切削技術の向上を図ることである。本論文の第2の目的は小規模企業が新規事業を起こすことにより, 下請け企業から研究開発型企業へ成長するための方向性を示すことである。

第1の目的である超短パルスレーザーを用いた新たなダイヤモンド工具成形技術を開発することにより切削技術の向上を図るために, まず, レーザ加工技術を導入する。次に, レーザ加工技術を用いた工具成形機を開発し, レーザによる工具成形技術を確立する。そして確立したレーザーによる工具成形技術を応用し, 複合材や難削材に対応した新たな工具の開発と, レーザ加工を用いて開発した工具による加工面粗さを制御する切削技術を確立することで, 切削技術の向上を図る。

第2の目的である本論文の第2の目的は小規模企業が新規事業を起こすことにより, 下請け企業から研究開発型企業へ成長するための方向性を示すために, まず, 6年間の事業実践内容を経験的・説明的に記述する。次に, 小規模工具メーカーが, 新に工具開発事業を起こした事例を対象として, 新規事業を起こすためには, 何が必要で何が重要かについて検討す

る。そして、それらの検討を通じて小規模企業が下請け企業から研究開発型企业へ成長するための方向性を示す。

以上から、本研究は、新たな切削技術を開発することにより、「輸送用機械器具」、「情報通信機械器具」、「素材産業」でも使われている加工技術を向上させ、日本の今後の技術力の発展と国際競争力の向上に寄与することを意図するものである。

1-4 本論文の構成

本論文は全7章により構成される。

第1章は論文全体の目的と構成について述べる。

第2章はレーザー加工技術について述べる。PCD（ダイヤモンド焼結体）工具を成形するためのレーザー加工技術の開発に関して論ずる。2-1はPCD工具成形技術、2-2はPCD工具刃先創成技術である。第2章のレーザー加工技術は、研究全体においてベースとなる技術である。これにより、ガラス樹脂積層材用PCD工具（第3章）と軟質樹脂用PCD工具（第4章）の2つの工具開発を行った。また、ストラクチャ付工具による加工面粗さ制御技術の開発（第5章）においても、第2章のレーザー加工技術がカギとなった。

第3章は1つ目の工具開発について述べる。ガラス樹脂積層材用PCD工具の開発である。レーザー微細加工技術を活用し、ガラス用切れ刃と樹脂用切れ刃を1本の工具に成形したPCD工具を開発することで、ガラスと樹脂の同時加工を可能とした。

第4章は2つ目の工具開発について述べる。軟質樹脂用PCD工具の開発である。レーザー微細加工技術を活用し、チップブレーカと呼ばれる微細な溝を工具に施すことにより、切りくずの排出性を向上させ、溶けやすい軟質樹脂でも容易な切削を可能とした。

第5章は切削技術の開発について述べる。ストラクチャ付工具による加工面粗さ制御技術の開発である。レーザー微細加工技術を活用し、PCD工具に微細な溝（ストラクチャ）を施し、工具回転主軸を傾斜することで加工面粗さの制御を可能とする技術の開発である。

第6章は小規模企業が新規事業を起こすことにより、下請け企業から研究開発型企业へ成長するための方向性について述べる。まず、6年間にわたる事業実践内容（研究内容は第2章～第6章）を経験的・説明的に記述する。次に、小規模工具メーカーが、新に工具開発事業を起こした事例を対象として、新規事業を起こすためには、何が必要で何が重要かについて検討する。そして、それらの検討を通じて小規模企業が下請け企業から研究開発型企业へ

成長するための方向性を示す。

第7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。

以上、全7章の本論文の構成を Fig.1-4 にまとめる。

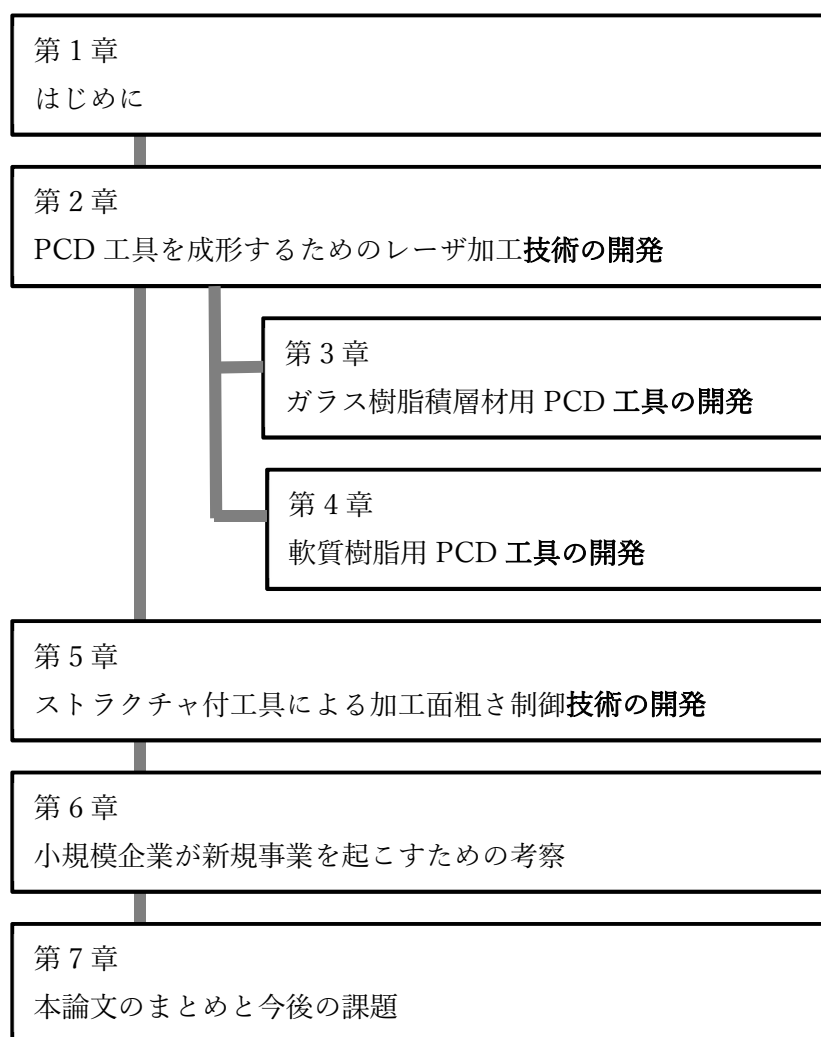


Fig.1-4 本論文の構成

第 1 章の参考文献

- [1] 長谷川慶太郎, 日本企業の生きる道, PHP 研究所, 2013.
- [2] 平成 26 年 経済産業省 工業統計調査, 2016.
<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kougyo/result-2/h26/kakuho/sangyo/index.html>, (参照 2019-05-20).
- [3] 経済産業省, 素材産業におけるイノベーションの役割と期待, 2018.
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/mono/chemistry/downloadfiles/180112materials-innovation.pdf, (参照 2019-05-15).
- [4] 日本機械学会, 機械実用便覧, 丸善, 1971.
- [5] 砥粒加工学会, 改訂版 切削・研削・研磨用語辞典, 日本工業出版, 2016.
- [6] 小坂弘道, 切削加工の基本知識, 日刊工業新聞社, 2009.
- [7] 長田晃, ハードマテリアルの最近の開発動向および今後の課題, 精密工学会誌, Vol.76, No.12, p.1315-1318, 2010.
- [8] 南久, 渡邊幸司, 増井清徳, 鍋倉伸嘉, 放電加工による焼結ダイヤモンド工具の成形加工, 電気加工学会誌, Vol.44, No.105, p.17-24, 2010.
- [9] 佐野定男, ハンイリ, 岩井学, ニノ宮進一, 植松哲太郎, 鈴木清, PCD 工具を利用した放電・研削逐次加工法の開発, 砥粒加工学会誌, Vol.52, No.9, p.537-542, 2008.
- [10] 佐野定男, 岩井学, 植松哲太郎, 鈴木清, 各種多結晶ダイヤモンド焼結体 (PCD) 電極の放電加工特性, 砥粒加工学会誌, Vol.52, No.5, p.283-288, 2008.
- [11] C. Dold, M. Henerichs, P. Gilgen, K. Wegener, Laser Processing of Coarse Grain Polycrystalline Diamond (PCD) Cutting Tool Inserts using Picosecond Laser Pulses, Physics Procedia, Vol. 41, pp.610-616, 2013.
- [12] 天本祥文, 吉田昌史, 仙波卓弥, 角谷均, ナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトに対するレーザ成形技術, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 78, No. 794, pp. 3583-3593, 2012.
- [13] 仙波卓弥, 天本祥文, 角谷均, ナノ秒パルスレーザを用いたナノ多結晶ダイヤモンド製ノーズ R バイトに対する走査線加工技術, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.851, pp.16-00573, 2017.
- [14] 鈴木大輔, 河田圭一, 糸魚川文広, 中村隆, ナノ秒パルスレーザを用いた超砥粒焼結工具材の形状創成, 2010 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, E09, pp. 277-278, 2010.

第2章 PCD 工具を成形するためのレーザ加工技術の開発

第2章はPCD（ダイヤモンド焼結体）工具を成形するためのレーザ加工技術の開発に関して論ずる。2-1 はPCD 工具成形技術，2-2 はPCD 工具刃先創成技術である。それぞれ背景，目的，方法と結果，考察について記す。

2-1 PCD 工具成形技術

アルミニウム等の非鉄金属やアクリル等の樹脂の切削加工において，近年，PCD 工具（PCD を刃先に使用した切削工具）が多用されている。PCD（Poly Crystalline Diamond）とは，多結晶ダイヤモンド，ダイヤモンド焼結体とも呼ばれ，ダイヤモンドの微粉末にコバルト等の結合剤の粉末を添加，超高压，高温で焼結した焼結体のことである [1]。

しかし，難削材や複合材に対応できるPCD 工具は小径化，形状の微細化・複雑化，多数枚刃化等が要求されるため，PCD 工具を成形する従来の技術（砥石研削，放電加工）では精度や形状に限界がある。そこで，難削材や複合材に対応できる新たなPCD 工具を開発することを目的として，超短パルスレーザを搭載した工具成形機と，PCD 工具を成形する技術を開発した。

2-1-1 背景

PCD 工具は非鉄金属や樹脂の切削において多用され，需要が増えている。Fig.2-1-1 のように，切削加工は工作機械を用いた加工方法の一つである [2]。



Fig.2-1-1 Processing classification.

引用 <http://www.jmtba.or.jp/machine/introduction>

切削加工とは、工作物あるいは工具が回転することによって除去する加工であり、汎用的な加工方法の一つである [3]。例えば、板材を切り抜く加工において、Fig.2-1-2 のようなプレス加工 (Press)、レーザ加工 (Laser)、ウォータージェット加工 (Water Jet) 等があるが、切削加工は使用する工作機械が比較的安価であることから、初期トライに用いられる。

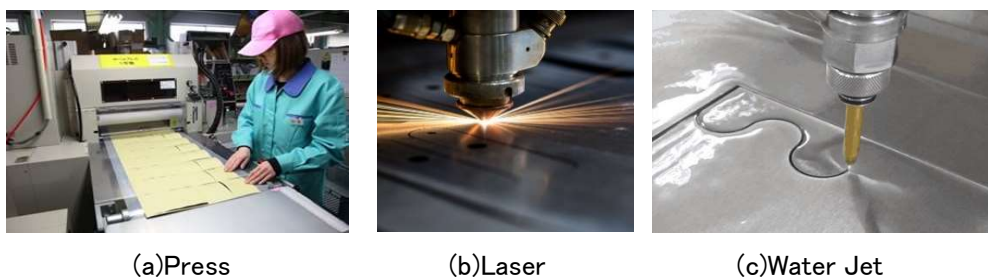


Fig.2-1-2 Processing technology.

引用(a) <http://www.nomura-fc.co.jp/setsubi1.html>

引用(b) <http://www.sevensix.co.jp/product/application/laser-processing/>

引用(c) <http://www.amateras-tyo.biz/tech/tech02.html>

PCD の材料であるダイヤモンドは、地球上でもっとも硬い物質であり、究極の工業材料として知られている。しかし、同じダイヤモンドでも、単結晶ダイヤモンドは〈111〉面に平行にへき開し、簡単に割れること、また大きな機械的な剪断力には耐えられないことから、工具素材としての用途は限定される。それに対して、Fig.2-1-3 のような PCD は、微細なダイヤモンド結晶がランダムに配向し、相互に結合した構造を有しているため、へき開割れによる欠けが生じないことが大きな特長である。また、コバルト等の結合剤がダイヤモンド粒子間に介在することによる粘り強さ (靱性) もあることから、過酷な加工条件にも対応できる利点がある [1]。



Fig.2-1-3 PCD (Poly Crystalline Diamond).

引用 <http://www.tomeidiamond.co.jp/diasyouketu/DIAs.html>

工具の刃先に用いられる材料である工具材種には、粘り強さ (靱性) と硬さ (耐摩耗性) の相反する特徴が求められる。それらの関係を Fig.2-1-4 に示す。

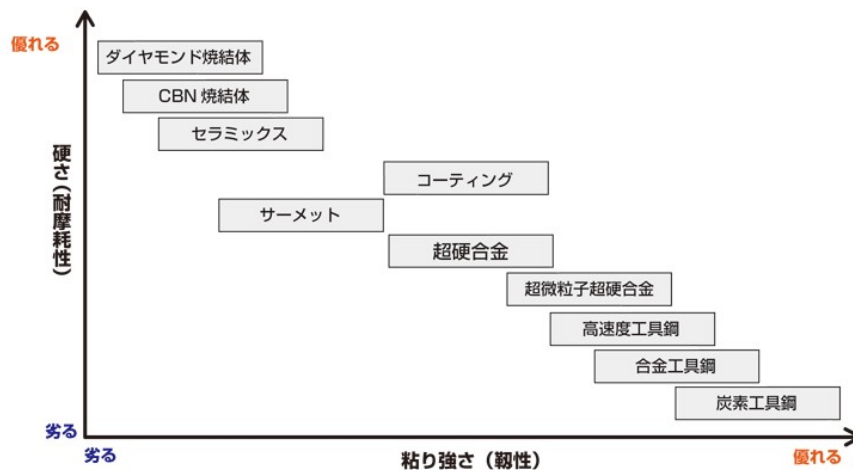


Fig.2-1-4 Material of cutting tool.

引用 https://www.monotaro.com/s/pages/readingseries/sessakukiso_0102/

PCD は工具材種の中では最も硬く、耐摩耗性に優れるため、ハイシリコンアルミ、銅、マグネシウム等の非鉄金属や、樹脂、グラファイト、予備焼結セラミックス等の切削工具に多用されている [4].

Fig.2-1-5 のように機械工具・ダイヤモンド工具・ダイヤモンド切削工具(バイト・カッタ・リーマ・ドリル・フライス・エンドミル等)の 2018 年の生産金額は前年比 13.3%増の 13,086 百万円。5 年間では 28%増加している [5].

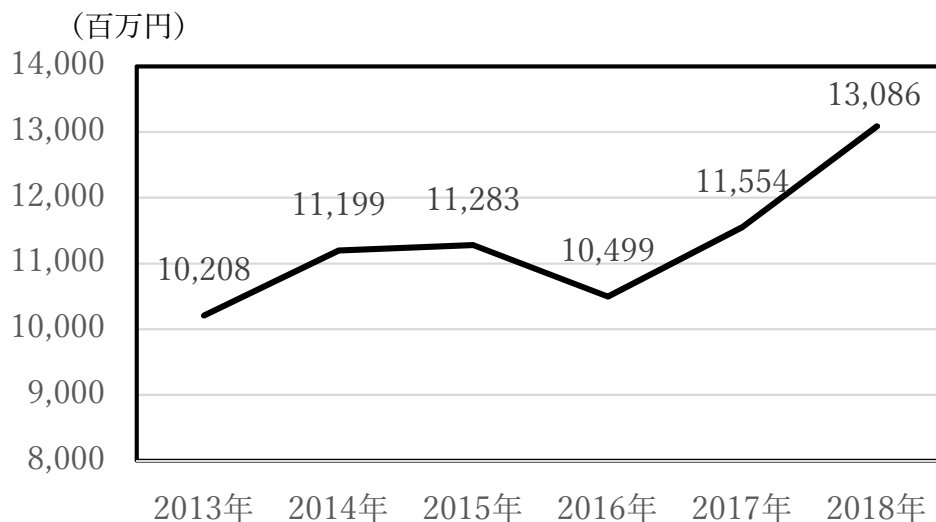


Fig.2-1-5 Production value: Machine tools_diamond tools_diamond cutting tools (cutting tools, cutters, reamers, drills, milling cutters, end mills, etc.)

引用 経済産業省生産動態統計年報 機械統計編より筆者作成

Fig.2-1-6 は樹脂用 PCD エンドミルの例であり，液晶カバー材等の切り抜き加工 (Fig. 2-1-7) 等に用いられる。



Fig.2-1-6 PCD end mill.

引用 <https://www.inh.co.jp/~uhs/product.html>

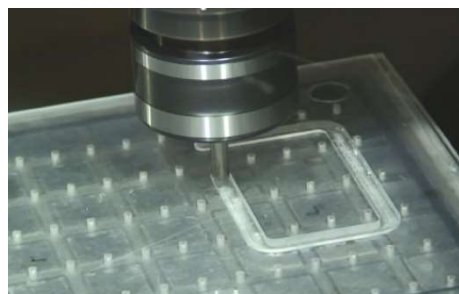


Fig.2-1-7 Cutting plastic with PCD end mill.

切り抜き加工中の写真より

2-1-2 目的

PCD 工具を成形する従来技術では，精度や形状に課題がある．一般的に PCD 工具の刃先は砥石研削や放電加工によって成形される．Fig.2-1-8(a)のような砥石研削 (GRINDING) では機械的な力によりダイヤモンド粒子や結合材の脱落により刃先を成形するため，鋭利な切れ刃を得ることが難しい [6]．また，Fig.2-1-8(b)のような放電加工 (EDM) ではコバルト等の導電性結合材との間における放電による除去によりダイヤモンド粒子が脱落する．このため，切れ刃先端部の鋭利さをダイヤモンド粒径以下にすることは困難である．



(a)GRINDING



(b)EDM

Fig.2-1-8 Tool forming method.

引用(a) https://www.makinoseiki.co.jp/product/07_movie.html

引用(b) <https://www.walter-machines.com/jp/products/eroding/helitronic-power-diamond.html>

近年，レーザによる工具成形技術も開発されてきている [7] が，鋭利な刃先創成については未だ十分でない．さらにレーザは加工時間と仕上げ面および成形精度はトレードオフの関係にあり，その両立が課題となっている．

微細で複雑な PCD 工具を開発することを目的とし，超短パルスレーザを搭載した新たな工具成形機の開発と，その装置を用いた PCD 工具成形技術の開発を行う．超短パルスレー

ザとは、1パルスの時間幅（パルス幅）がおおむねピコ（ 10^{-12} ）秒オーダーからフェムト（ 10^{-15} ）秒オーダーのレーザーのことを指す。超短パルスレーザーはナノ（ 10^{-9} ）秒パルスレーザーに比べ、アブレーション（非熱）加工に適するため、照射物に対する熱影響が少ないことが特徴である。PCDの刃先成形に対して、最適なレーザー発振器を選定し、工具成形に適した工学設計、機構設計を行う。また、PCDに対する最適なレーザー照射条件を導出することにより、PCD工具の刃先成形を可能とするレーザー加工技術の開発を行う [8] [9]。

実験に先立って先行研究調査を行った。PCDの成形（Forming）におけるレーザー加工の先行研究 [10] [11] [12] [13] の調査により、PCD工具の成形に適したレーザー発振器の候補選定を行った。定量的なデータが無い資料もあったため、定性的な結果をまとめ Table2-1-9 に示す。Table2-1-9において、○は加工品位が良好、×は加工品位が不十分、△は照射条件の工夫により加工品位が良好になる可能性があるものとした。

Table2-1-9 Suitability of laser oscillator (investigation).

	UV (355nm)	GREEN (532nm)	IR (1064nm)	CO2 (10.6 μ m)
Micro second	—	—	Forming×	Forming×
Nano second	Forming△	Forming○	Forming×	—
Pico second	Forming△	Forming○	Forming○	—

以上の先行研究調査の結果より、以下のことが判明した。パルス幅がマイクロ秒（Micro second）の場合は波長に寄らず不適である。パルス幅がナノ秒（Nano second）の場合は波長 GREEN（532nm）以下が適する。パルス幅がピコ秒（Pico second）の場合は波長 IR(1064nm)以下が適する。しかし、PCDの鋭利な刃先の創成（Edge）に関する先行研究は、見つけれなかった。

2-1-3 レーザ発振器適性調査実験の方法と結果

PCDに対して各種レーザーを照射し、発振器（レーザーの波長とパルス幅）の適性を調査した。評価方法は加工の有無、照射面の粗さ、除去効率により行った。レーザー照射条件は、それぞれの発振器に最適な条件を採用した。照射面の粗さは、ルーペ、顕微鏡を用い、目視にて観察した。加工深さはレーザー顕微鏡を用いて測定した。除去効率は、照射時間と加工深さから計算した。下記、10種類の発振器に対して実験を行った。カッコ内はレーザー発振器メーカーまたは実施場所を示す。

- レーザー発振器① パルスファイバーレーザー (DMG 森精機)
- レーザー発振器② IR ピコ秒レーザー (浜松工業技術支援センター)
- レーザー発振器③ GREEN ナノ秒レーザー (渋谷工業)
- レーザー発振器④ IR ナノ秒レーザー (レーザープラス, YKT)
- レーザー発振器⑤ GREEN ピコ秒レーザー (トルンプ)
- レーザー発振器⑥ GREEN ピコ秒レーザー (浜松ホトニクス)
- レーザー発振器⑦ IR ピコ秒レーザー (浜松ホトニクス)
- レーザー発振器⑧ UV ピコ秒レーザー (コヒレント)
- レーザー発振器⑨ CO2 パルスレーザー (レーザーックス)
- レーザー発振器⑩ UV ナノ秒レーザー (レーザーックス)

Table2-1-10 Suitability of laser oscillator (experiment).

	UV (355nm)	GREEN (532nm)	IR (1064nm)	CO2 (10.6 μ m)
Micro second	—	—	—	Forming× Edge×
Nano second	Forming△ Edge×	Forming○ Edge×	Forming× Edge×	—
Pico second	Forming△ Edge○	Forming○ Edge×	Forming○ Edge×	—

Table2-1-10 において、○は加工品位が良好、×は加工品位が不十分、△は照射条件の工夫により加工品位が良好になる可能性があるものとした。その結果、成形 (Forming) にはナノ秒 (Nano second) 以下のパルス幅と IR(1064nm)以下の波長が必要であることが分かった。鋭利な刃先の創成 (Edge) には、ピコ秒(Pico second)以下のパルス幅と UV(355nm)以下の波長が必要であることが分かった。

以上の結果より、レーザー発振器のパルス幅はピコ秒を選定した。

2-1-4 レーザ波長適性調査実験の方法と結果

ピコ秒レーザーにおける波長の適性を調査する実験を行った。波長 IR (1064nm) と UV(355nm) による加工面粗さの違いを検証した。Table2-1-11 は、実験に使用した照射条件である。

Table2-1-11 Laser parameters.

	IR	UV
Wavelength	1064nm	355nm
Pulsewidth	10ps	15ps
Frequency	500kHz	200kHz
Scanning speed	1000mm/s	600mm/s

Fig.2-1-12 は表面粗さ Ra を測定 (Veeco 社製光干渉表面形状粗さ計 : Wyko NT9100) した 3D 表示結果である。

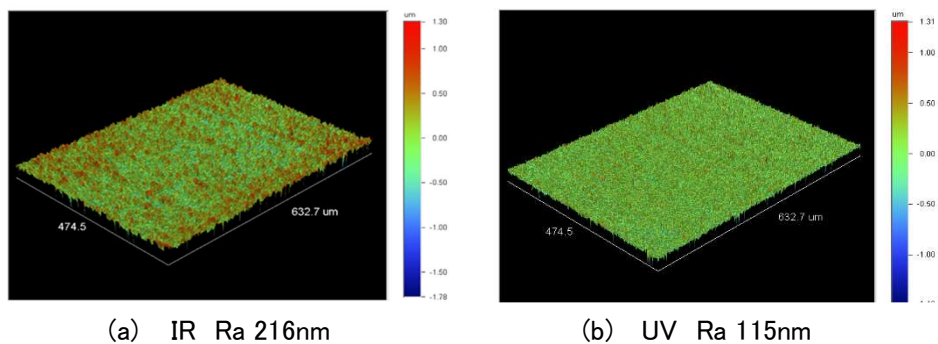


Fig.2-1-12 Surface Roughness.

Fig.2-1-12 の画像からもわかるように、IR に比べ UV は表面粗さが向上している。表面粗さ Ra は、IR は 216nm、UV は 115nm となり、IR に比べて UV の方が 100nm ほど向上した。これより、波長は IR よりも UV の方が鋭利な刃先創成が可能であると考えた。

先行研究調査、レーザ発振器適性調査実験、波長適性調査実験より、PCD 工具の成形には IR ピコ秒を、鋭利な刃先創成には UV ピコ秒を選定した。

2-1-5 超短パルスレーザを搭載した工具成形機の開発

超短パルスレーザを搭載した PCD 工具成形機を開発した。Fig.2-1-13 は開発した工具成形機の外観図である。Fig.2-1-14 は開発した工具成形機のシステム構成である。超短パルスレーザを発振させ、ガルバノスキャナと Fθ レンズによって所定の位置に切れ刃を成形する。機内には CCD カメラが設置されており、切れ刃の成形状態を機上で観察できるオンマシン計測機能を搭載している。これにより、工具脱着時の精度劣化を防ぐことができ、高精度な工具成形が可能である。本装置は IR、GREEN、UV の 3 波長のピコ秒レーザ光源を搭載し、IR ピコ秒レーザで工具形状を成形し、UV ピコ秒レーザで鋭利な刃先を創成することにより、加工能率と表面仕上げ・精度の向上を図っている。



Fig.2-1-13 Ultrashort pulse laser fabrication system.

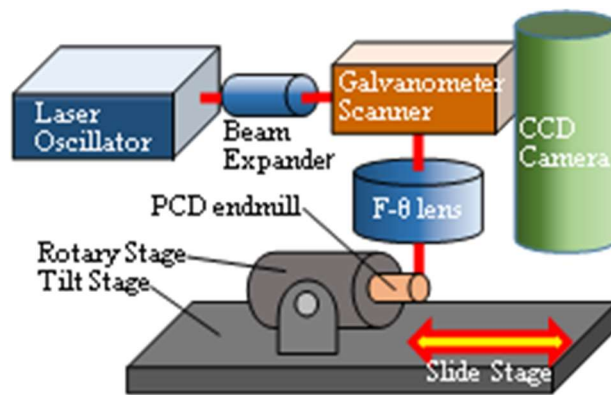


Fig.2-1-14 Tool forming machine with ultrashort pulse laser.

2-1-6 レーザ照射条件設定における反射率の測定

PCD の反射率の波長依存性を測定し、波長による吸収率特性を検証した。Table2-1-15 のように 5 種類の PCD 材料（ダイヤモンド粒径 0.5 μm 、2 μm 、8 μm 、25 μm ）に対する 200～1200nm の波長域における反射率測定（島津製作所製紫外可視近赤外分光光度計：UV-3150）を行った。

Table2-1-15 PCD grade and particle size.

Grade	Company	particle size (μm)
DA2200	住友電工	0.5
CTB002	エレメントシックス	2
H80(Non Lap)	トーメイダイヤモンド	8
HM80(Lap)	トーメイダイヤモンド	8
CTB302	エレメントシックス	25

その結果を Fig.2-1-16 に示す。PCD の反射率は 300～1200nm の波長域において数%の変化しかなく、波長に依存しないことが分かった。つまり光の吸収率においても波長依存性

がないと言えるため、波長による加工性に違いが無いことが分かった。また、PCD のダイヤモンド粒径による反射率の違いも無いことが分かった。

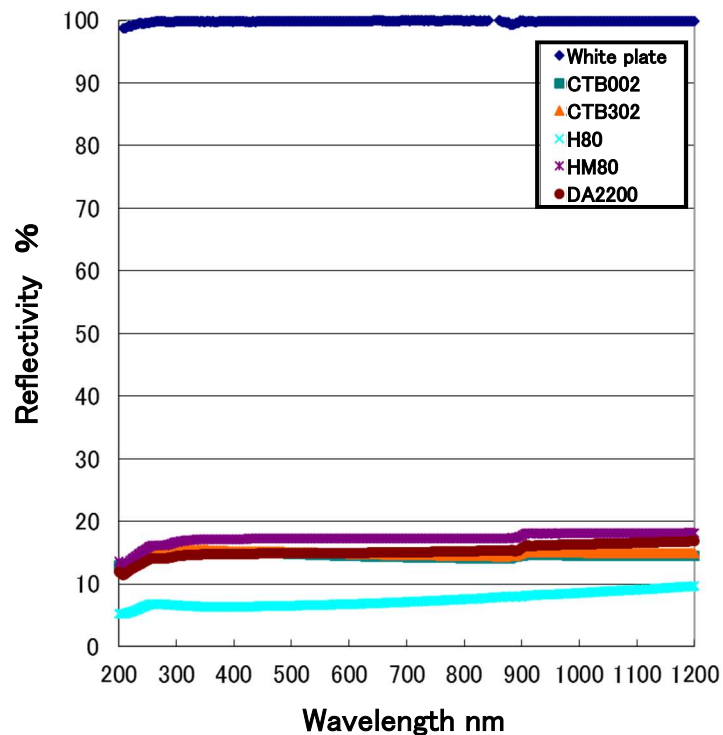


Fig.2-1-16 Relationship between wavelength and reflectance.

2-1-7 レーザ照射条件設定における除去効率と表面粗さの測定

PCD 工具に微細な刃形を成形する目的として、開発した工具成形機を用い、波長 1064nm, 355nm のレーザーにおける最適な照射条件のうち除去効率と表面粗さを導出した。

PCD に対する最適なレーザー照射条件を除去効率と表面粗さから求める。最初に波長は IR を用いる。Fig.2-1-17 のように縦・横 2mm の範囲を、走査ピッチは 3 μ m にて格子状に照射した。Fig.2-1-18 は PCD 表面に照射した加工痕である。

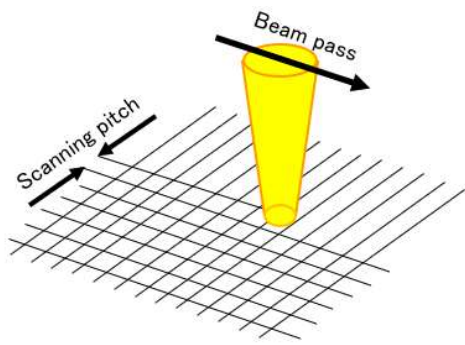


Fig.2-1-17 Beam pass.



Fig.2-1-18 PCD removal.

照射条件は Table2-1-19 のように波長 1,064nm, パルス幅 15ps 弱, 繰返し周波数は 0~200kHz とした. 平均出力と繰返し周波数をパラメータとして, 単位面積当たりのエネルギー密度を表すフルエンスを制御し, 0~3.7J/cm² の範囲で可変とした. スポット径は 33μm だった.

Table2-1-19 IR laser parameters.

Wavelength	1064nm
Pulsewidth	< 15ps
Frequency	~200kHz
Scanning speed	100~500mm/s
Scanning pitch	3 μm

走査速度が 100~500mm/s の時, フルエンスに対する除去効率 (投入エネルギー当たりの除去体積) を調べた. 除去体積は照射範囲とレーザ顕微鏡 (オリンパス製レーザ顕微鏡: OLS3000) にて測定した深さを乗じて算出した. 結果をグラフ化したものが Fig.2-1-20 である.

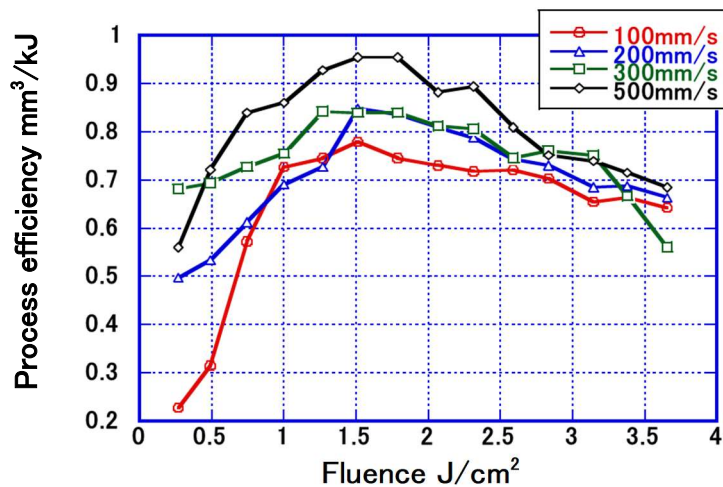


Fig.2-1-20 Relationship between fluence and processing depth in IR picosecond laser.

いずれの走査速度においても、フルエンスの増加に伴い除去効率も増加するが、フルエンス $1.5\text{J}/\text{cm}^2$ 以上では除去効率が低下する傾向にあることが分かった。実験時に撮影した動画には、プラズマが発生したと思われる柱状の光が観察されているため、除去効率が低下する理由の一つとしてプラズマの発生と考える。プラズマが発生すると、レーザーが吸収されるため、加工点に到達するエネルギー量が減少するため、投入エネルギー量に対する除去効率の低下に繋がっていると考えられる。

以上より、除去効率の観点からすると、フルエンス $1.5\text{J}/\text{cm}^2$ 付近が最適な照射条件であると結論付けた。

次に、フルエンス $1.5\text{J}/\text{cm}^2$ における走査速度と表面粗さの関係を調べた。粗さ測定には Veeco 社製光干渉表面形状粗さ計：Wyko NT9100 を用いた。結果を Fig.2-1-21 に示す。

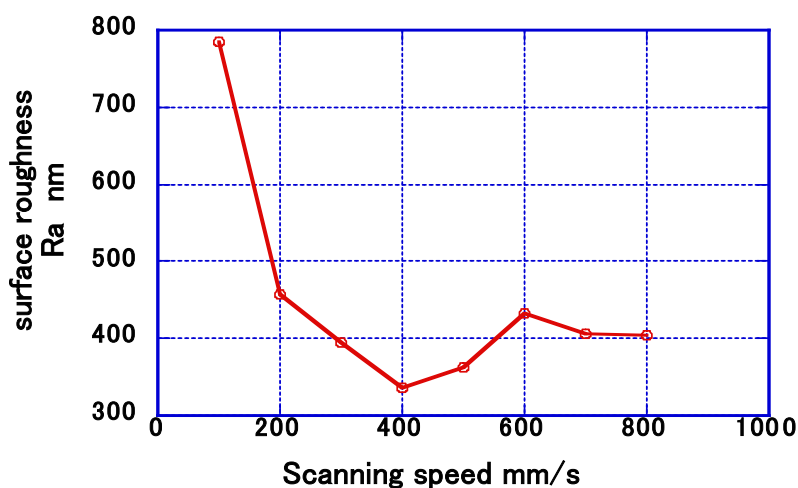


Fig.2-1-21 Relationship between scanning speed and surface roughness in IR picosecond Laser.

走査速度を $100\sim 800\text{mm}/\text{s}$ まで変化させた時の表面粗さ Ra を調べた結果、走査速度 $400\text{mm}/\text{s}$ の時、表面粗さ Ra が最小となった。走査速度は、遅いと入熱による影響により加工面が悪くなり、走査速度が速いと、パルスとパルスの重なる割合であるオーバーラップ率が低下することで表面が悪くなる。そのバランスの取れた走査速度が $400\text{mm}/\text{s}$ であると考えられる。

以上より、PCD に対する IR ピコ秒レーザーの最適照射条件はフルエンス $1.5\text{J}/\text{cm}^2$ 、走査速度 $400\text{mm}/\text{s}$ である。

次に、UV ピコ秒レーザーを用いた PCD に対する最適なレーザー照射条件を除去効率と表面粗さから求める。IR と同様に、Fig.2-1-17 のように縦・横 2mm の範囲を、走査ピッチは $3\mu\text{m}$ にて格子状に照射した。照射条件は Table2-1-22 のように波長 355nm 、パルス幅 15ps 弱、繰返し周波数は $0\sim 200\text{kHz}$ とした。平均出力と繰返し周波数をパラメータとして、フルエンスを制御し、 $0\sim 0.6\text{J}/\text{cm}^2$ の範囲で可変とした。スポット径は $15\mu\text{m}$ だった。

Table2-1-22 UV laser parameters

Wavelength	355nm
Pulsewidth	< 15ps
Frequency	~200kHz
Scanning speed	100~500mm/s
Scanning pitch	3 μ m

走査速度が 100~500mm/s の時のフルエンスと除去効率の関係を調べた。結果を Fig.2-1-23 に示す。

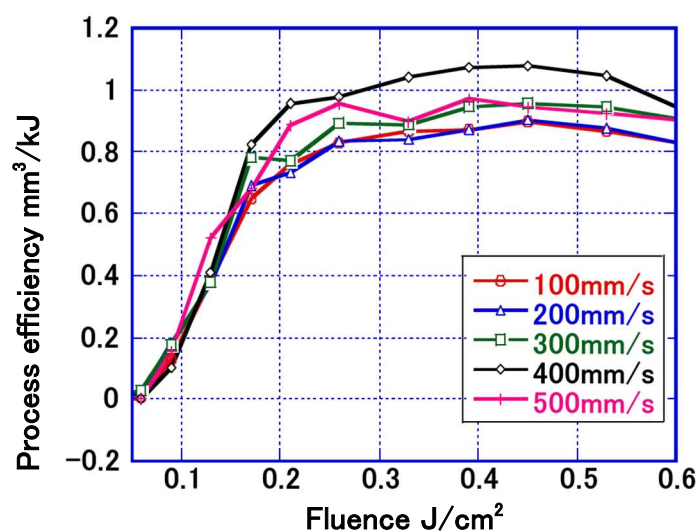


Fig.2-1-23 Relationship between fluence and processing depth in UV picosecond laser.

フルエンス 0.2J/cm² 以上では、除去効率が上昇しないため、フルエンス 0.2J/cm² が最適と判断した。

次にフルエンス 0.2J/cm² における走査速度と表面粗さの関係を調べた結果を Fig.2-1-24 に示す。走査速度 500mm/s を超えて、700mm/s の時に表面粗さ Ra が最小となった。

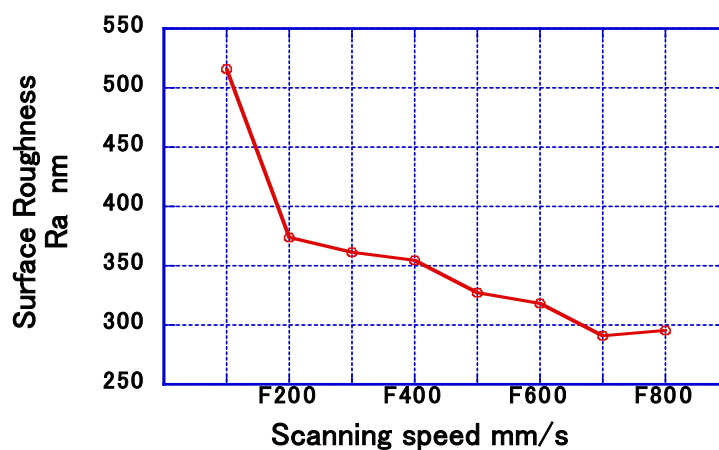


Fig.2-1-24 Relationship between scanning speed and surface roughness in UV.

UV ピコ秒レーザに対しても、IR ピコ秒レーザと同じように、プラズマによる除去効率への影響、入熱とオーバーラップ率による表面粗さへの影響があると考えられる。

以上より、PCD に対する UV ピコ秒レーザの最適照射条件はフルエンス $0.2\text{J}/\text{cm}^2$ 、走査速度 $700\text{mm}/\text{s}$ である。

2-1-8 レーザ照射条件設定のための変質層の測定

PCD 工具に微細な刃形を成形する目的として、開発した工具成形機を用い、波長 1064nm 、 355nm のレーザにおける最適な照射条件のうち変質層を測定した。

PCD 工具は加工変質によりダイヤモンド構造が崩れると、工具寿命が大きく低下してしまう。そのため、工具刃先における加工変質層の有無を確認しておくことが重要である。そこで、開発した工具成形機において導出したレーザ照射条件を用い、レーザ照射前後のダイヤモンド変質具合を調べた。Fig.2-1-25 はレーザ照射前後の PCD 表面のラマン分光計測結果である。測定にはオーションフォトニクス製ポータブルラマンシステム：OP-RAM-785-1064 を使用した。

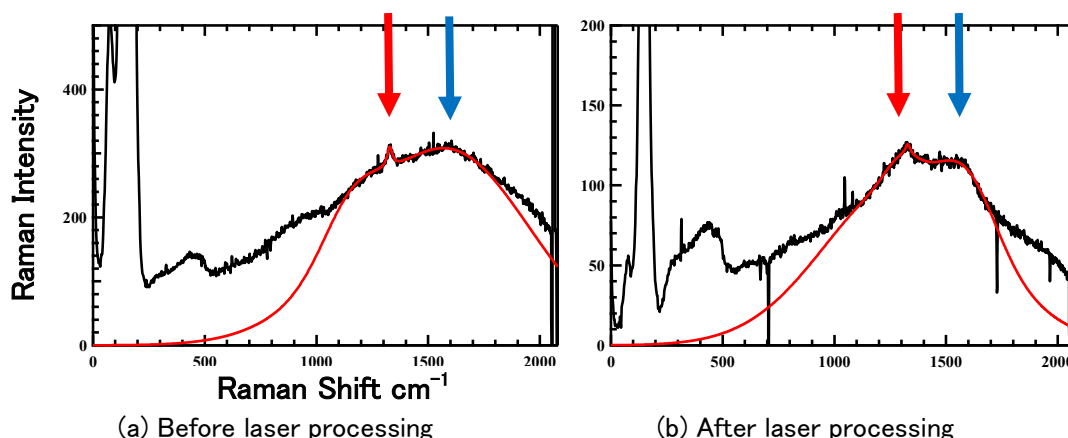


Fig.2-1-25 Raman spectroscopy results

先行研究により 1330cm^{-1} 付近（図中赤線）のピークはダイヤモンド由来の信号であり、 1550cm^{-1} 付近（図中青線）のピークはダイヤモンドライクカーボン(DLC)もしくはカーボンブラック由来の信号である [1]。ラマン信号の強度はダイヤモンド成分などの量と比例関係にあるため、ピークの強度面積を求めレーザ照射前後での比を取ることでダイヤモンドがどの程度の割合で変性したのかを定量的に評価できる。

Table2-1-26 は IR および UV ピコ秒レーザの照射条件を変えたときのラマン分光計測により決定したダイヤモンド成分の変性しなかった割合をまとめたものである。

Table2-1-26 Change of diamond content.

高繰返し周波数			低繰返し周波数				
波長	IR	UV	波長	IR	UV		
走査回数	1回	19.0%	21.1%	走査回数	1回	15.8%	24.4%
	2回	15.3%	15.2%		2回	17.2%	21.8%
	5回	20.3%	17.6%		5回	11.2%	35.4%
	10回	22.4%	14.9%		10回	17.5%	26.8%

数値は大きいほどダイヤモンド成分が変性しなかったことを示している。結果より、高繰返し周波数よりも低繰返し周波数による場合、IRよりもUVの場合のほうが、ダイヤモンドの割合が多く残っていることが示された。

以上より、ラマン分光計測を用いることで、レーザー照射前後のPCD内のダイヤモンドの変性割合を定量的に評価できることと、低繰返し周波数によるUVピコ秒レーザーがPCD工具成形に適することがわかった。

2-1-9 考察

PCD工具に微細な形状を成形する目的として、3波長をそれぞれガルバノスキャナで操作でき、機上計測機能を搭載したことを特長とする超短パルスレーザーを搭載した工具成形機を開発した。また、最適なレーザー照射条件を求めることで、PCD工具を成形する技術を開発した [15]。

レーザー照射条件の最適化には、プラズマによる除去効率への影響や、入熱によるダイヤモンドにおける変質への影響も考慮する必要があることがわかった。ダイヤモンドの変質は工具寿命に大きく影響するため、ラマン分光法による変質具合の定量的な測定は、今後の工具開発や工具製造において重要な役割を担うと考えられる。

2-2 PCD 工具刃先創成技術

開発した超短パルスレーザによる工具成形機を用いて、PCD（多結晶ダイヤモンド）工具に鋭利な刃先を創成する技術の開発を行った。PCD 工具における鋭利な刃先を創成する技術について概要に続けて、背景、目的、実験結果、考察について記す。

2-2-1 背景

PCD 工具は鋭利な刃先が求められている。アルミニウム、銅等の非鉄金属や樹脂の切削に多用されている PCD 工具は、切削抵抗の低減、切りくず排出性の向上、繊維の切断、切削面品位の向上に対応するため、刃先の鋭利性が要求されている。刃先の鋭利性は Fig.2-2-1 のように刃先丸みの大きさにて表される。

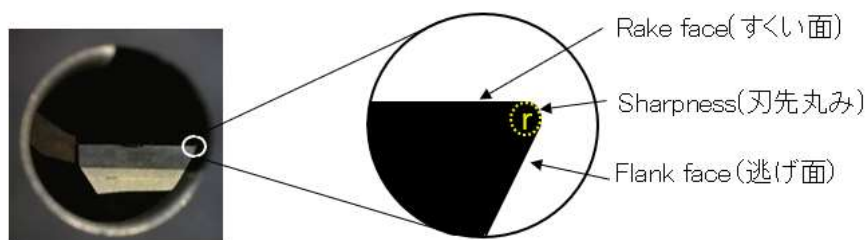


Fig.2-2-1 Sharpness of the tool edge.

2-2-2 目的

放電加工や砥石研削等の従来技術では PCD 工具刃先の鋭利化に限界がある。従来技術ではダイヤモンド粒径以下には刃先を鋭利化することが困難である。そこでレーザによる微細加工技術 [14] が注目されているが、普及には至っていない。

レーザ微細加工技術を適用し、PCD 工具の刃先を鋭利化することを目的とする。レーザ加工のメリットはダイヤモンドの粒をカットできることである。また、放電加工や砥石研削における砥石や電極等の消耗が不要となり、コスト的なメリットも期待できる。さらには、砥石研削ではできないような自由な形状の刃先を創成することも可能となる [15]。

2-1 のレーザ加工技術を用いて、PCD 工具の鋭利な刃先を実現した。この刃先創成技術の優位性を以下の 3 つ工具刃先創成実験により確認した。

- 工具刃先創成における表面粗さ、刃先丸みの確認実験
- 工具刃先創成におけるダイヤモンド粒径の影響
- 工具刃先創成における波長の影響

2-2-3 工具刃先創成における表面粗さ, 刃先丸みの確認実験

PCD 工具刃先の表面粗さと刃先丸みにおける, 従来技術とレーザー加工を比較により, レーザ加工の優位性を確認した.

放電加工 (EDM) 仕上げと, EDM 後の砥石研削 (GRINDING: SD2000 ダイヤモンド砥石) 仕上げ, EDM 後のレーザー照射 (IR と UV) 仕上げを行った. レーザ顕微鏡 (キーエンス製レーザー顕微鏡: VK-X1000) にて撮影した 3D 画像を比較したものが Fig.2-2-2 である. 逃げ面はレーザー照射した面であり, すくい面には未照射である. 逃げ面の凹凸具合で表面粗さを判断した. 逃げ面とすくい面の稜線が刃先を成している. 画像から EDM や砥石研削と比べ, レーザ加工 (IR と UV) は表面粗さ, 刃先の鋭利性に優れることが分かる.

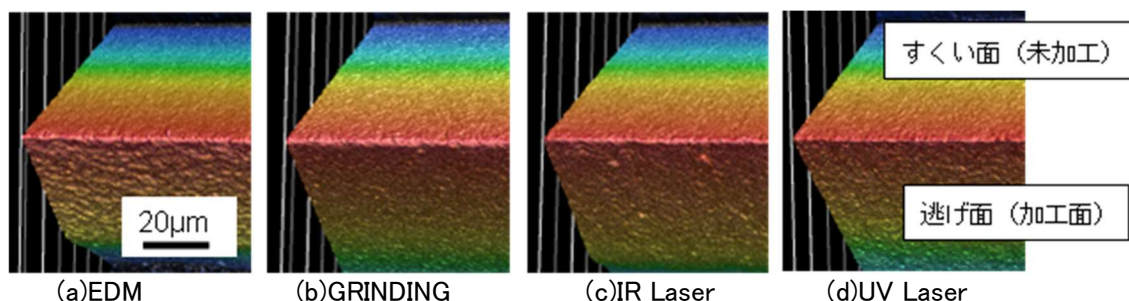


Fig.2-2-2 Comparison of cutting edges

レーザー顕微鏡 (キーエンス製レーザー顕微鏡: VK-X1000) には, 画像表示以外に表面粗さを数字 (平均値, 標準偏差) で出力し, グラフ表示する機能がある. その機能を用いて表面粗さの比較を行った結果を Fig.2-2-3 に示す. その結果, UV レーザ加工は $0.10\mu\text{m}$, 砥石研削 (GRINDING) は $0.15\mu\text{m}$ となり, 表面粗さ Ra は $0.05\mu\text{m}$ 改善した.

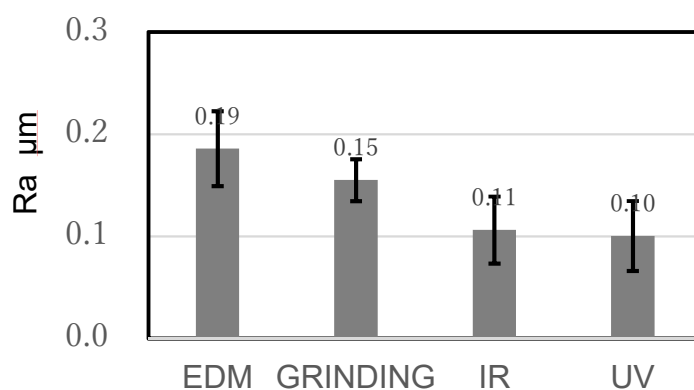


Fig.2-2-3 Comparison of Roughness Ra.

レーザー顕微鏡 (キーエンス製レーザー顕微鏡: VK-X1000) には, 画像表示, 表面粗さ以外に指定した断面のプロファイルを画像出力する機能がある. その断面プロファイル画像から 3 点を指定して, 3 点を結んだ円の半径を出力することができる. この機能を用いて指定した

円の半径を刃先丸みの数値とした。Fig.2-2-4 に刃先丸みの比較を示す。刃先丸み (Sharpness)は、IRではEDMとほぼ同等で1.3 μm であった。UVは0.72 μm であり、EDMの1.3 μm より0.58 μm 改善した。

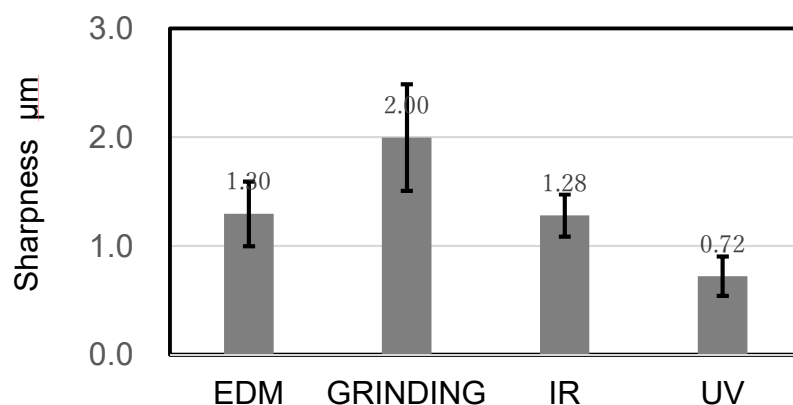


Fig.2-2-4 Comparison of Sharpness of the tool edge.

2-2-4 工具刃先創成におけるダイヤモンド粒径の影響

レーザ加工によるPCD工具刃先の創成におけるダイヤモンド粒径の影響を調べた。

粒径違いのPCDに対してUVピコ秒レーザを用いて刃先を創成し、刃先の鋭利性について放電加工(EDM)や砥石研削(GRINDING)の従来技術と比較することで、優位性を検証した。すくい面から撮影した画像を比較したものがFig.2-2-5である。

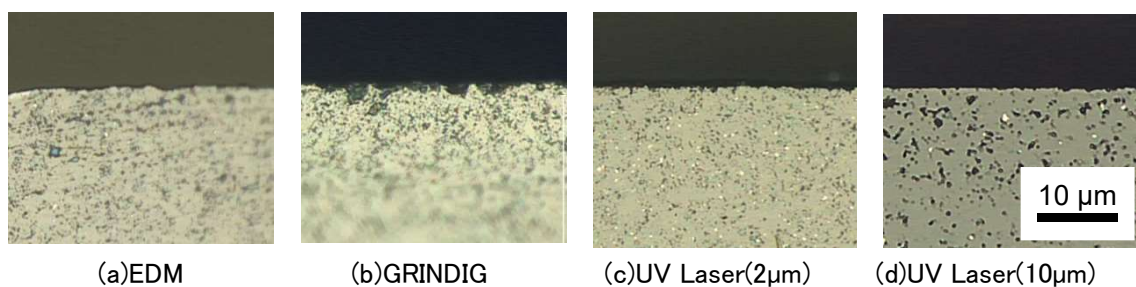


Fig.2-2-5 Comparison of conventional technology and ultrashort pulse laser

使用したPCDの粒径は、(a)(b)(c)は粒径2 μm 、(d)は10 μm である。測定はマイクロスコープ(キーエンス製マイクロスコープ:VHX-700F)を用いた。(a)(b)に比べて(c)(d)は刃先の直線性が良く、チッピングが少ないことが分かる。(d)はダイヤモンド粒径よりも小さなチッピング量となっていることから、ダイヤモンド粒をカットしていると考えられる。

2-2-5 工具刃先創成における波長の影響

PCD 工具の刃先創成において、ピコ秒レーザーの波長の影響を調べた。

UV レーザによる PCD 工具刃先創成の妥当性を検証するために、IR と UV のレーザーにて刃先創成した PCD 工具(Fig.2-2-6)によって樹脂を切削し、その切削面を比較した。切削条件を Table2-2-7 に示す。

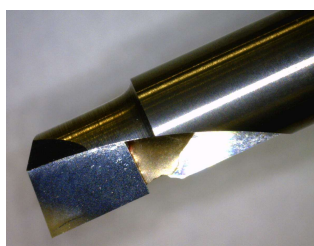


Fig.2-2-6 PCD endmill.

Table2-2-7 Cutting parameters

Workpiece	PMMA 2 mm
Tool diameter	ϕ 6 mm
Spindle speed	10,000 rpm
Cutting speed	188 m/min
Feed rate	100 mm/min
Lubrication	Dry

得られた切削面が Fig.2-2-8 である。UV ピコ秒レーザーで仕上げた工具の切削面の方が透明度と表面粗さが良いことが分かる。

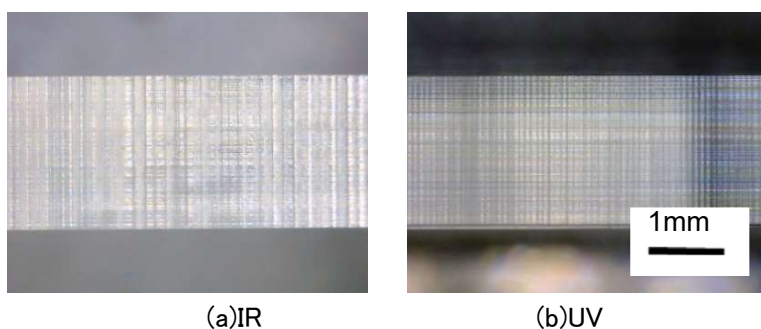


Fig.2-2-8 Cutting surface comparison by cutting tool finished using laser.

2-2-6 考察

開発した超短パルスレーザーによる工具成形機を用いて、PCD（多結晶ダイヤモンド）工具に鋭利な刃先を創成する技術の開発を行った結果、次の3点が確認できた。

工具刃先創成における表面粗さ、刃先丸みの確認実験より、表面粗さ、刃先丸みとも、レーザー加工技術が優れている。工具刃先創成におけるダイヤモンド粒径の影響は、ダイヤモンド粒径が大きくても、鋭利な刃先を創成できる。工具刃先創成における波長の影響は、切削において IR よりも UV に優位性がある。

実験の結果より、従来技術である放電加工と砥石研削に比べ、レーザによる刃先創成は、表面粗さと刃先丸みとも優れていることがわかった。放電加工では、電極とワークの間に発生する放電による熱エネルギーにより、PCD内の結合剤であるコバルト等の導電性物質を除去することでダイヤモンド粒子の脱落を促し、除去加工が進む。ダイヤモンドは非導電性のため、ダイヤモンド粒子自体の加工は難しく、ダイヤモンド粒子径以下の刃先丸みを創成することが困難である。砥石研削では、砥石内のダイヤモンド粒子と、PCD内のダイヤモンド粒子の摩擦により除去加工が進むため、刃先にはダイヤモンド粒子径程度の脱落痕が残る。このため、PCD内のダイヤモンド粒径以下の刃先丸みの創成は困難である。レーザ加工では、最適な照射方法、照射条件を選定することで、ダイヤモンド粒子自体をカットすることを実現した。パルスエネルギーを加工閾値付近に設定することで、1発当たりの最小の除去量にし、PCDに対するダメージを最小限にしていることが有効であると考えられる。また、斜め照射することで、選択的に表面の凸部分を除去し表面粗さが小さくなったと考えられる。照射方法や照射条件の最適化には、まだ工夫の余地があり、今後さらに刃先丸みを小さくできる可能性を秘めている。

IRレーザに比べUVレーザでの刃先丸みが小さくなった原因としては、波長の影響と考えられる。開発した工具成形機では、IRレーザのスポット径は約 $\phi 40\mu\text{m}$ 、UVレーザでは約 $\phi 15\mu\text{m}$ である。光学系の設計にもよるが、波長が短いことで、よりスポット径を絞ることが可能となった。スポット径が小さいことで、1パルス当たりの除去面積が小さくなり、刃先丸みが小さくなったと考えられる。また、波長は短いほど、吸収率が高いため、少ないエネルギーでも除去が可能となり、より微細な加工により刃先丸みが小さくなったと考えられる。

PCDはダイヤモンド粒径が大きいほど硬度が増し、工具寿命が延びるが、刃先丸みが小さくできない。逆に粒径が小さいと刃先丸みは小さくできるが、工具寿命が短くなるというトレードオフの特徴を持つ。そこで、大きな粒径のダイヤモンド粒子のPCDを用いて、刃先丸みを小さく刃先創成できれば、工具寿命が長く、切れ味の良い刃物を作ることが可能となる。UVピコ秒レーザを用いた刃先創成技術は、PCD工具の可能性を高めるものである。

2-3 まとめ

第2章はPCD工具を成形するためのレーザ加工技術の開発に関して論じた。工具成形技術に関して先行研究調査と予備実験を行った。その結果をもとに超短パルスレーザを搭載した工具成形機を開発した。開発したシステムを用いてPCD工具成形における照射条件の導出を行った。導出した照射条件によりPCD工具刃先を創成した結果、刃先の鋭利性を示す刃先丸みは、従来技術では $1.3\mu\text{m}$ であった。切削性を考慮して目標は $1\mu\text{m}$ 以下と設定した。その結果、UVピコ秒レーザを用いることにより $0.72\mu\text{m}$ を実現した。以上より、レーザを用いた工具成形技術における従来技術との優位性と工具としての妥当性を確認した。

第 2 章の参考文献

- [1] ダイヤモンド工業調査会編, ダイヤモンド技術総覧, NGT, 2007.
- [2] 日本工作機械工業会 HP, <http://www.jmtba.or.jp/machine/introduction>, (照 2019-05-23).
- [3] 日本機械学会 HP, <http://www.jmtba.or.jp/machine/introduction>, (参照 2019-05-10).
- [4] 小坂弘道, 切削加工の基本技術, 日刊工業新聞社, 2009.
- [5] 経済産業省生産動態統計年報 機械統計編 機械工具ダイヤモンド工具 ダイヤモンド切削工具(バイト・カッタ・リーマ・ドリル・フライス・エンドミル等), https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html#menu3, (参照 2019-05-10).
- [6] 戸倉和, ダイヤモンド 性質・合成・加工・応用, 精密工学会誌, Vol.78, No.3, pp.212-215, 2012.
- [7] C. Dold, M. Henerichs, P. Gilgen, K. Wegener, Laser processing of coarse grain polycrystalline diamond (PCD) cutting tool inserts using picosecond laser pulses, *Physics Procedia*, Vol. 41, pp.610-616, 2013.
- [8] 内山文宏, 超短パルスレーザーによる PCD 工具成形技術の開発: 小規模企業の産学官連携事例, レーザ加工学会誌, Vol.24, No.3, p.178-183, 2017.
- [9] 内山文宏, 楠本利行, 坪井昭彦, 松村隆, PCD(多結晶ダイヤモンド)工具刃先成形のための超短パルスレーザー加工技術の開発, レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会予稿集, 2018.
- [10] G. F. Zhang, B. Zhang, Z. H. Deng, J. F. Chen, An Experimental Study on Laser Cutting Mechanisms of Polycrystalline Diamond Compacts, *CIRP Annals*, Vol. 56, pp.201-204, 2007.
- [11] P. M. Harrison, M. Henry, M. Brownell, Laser processing of polycrystalline diamond, tungsten carbide, and a related composite material, *Journal of Laser Applications*, Vol. 18(2), pp.117-126, 2006.
- [12] T.V. Kononenko, M. Meier, M.S. Komlenok, S.M. Pimenov, V. Romano, V.P. Pashinin, V. I. Konov, Microstructuring of diamond bulk by IR femtosecond laser pulses, *Applied Physics A*, Vol. 90, pp.645-651, 2008.
- [13] V. V. Kononenko, T. V. Kononenko, S. M. Pimenov, M. N. Sinyavskii, V. I. Konov and F. Dausinger, Effect of the pulse duration on graphitisation of diamond during laser ablation, *Quantum Electronics*, Vol. 35, No.3, pp.252-256, 2005.
- [14] C. Dold, M. Henerichs, P. Gilgen, K. Wegener, Comparison of ground and laser machined polycrystalline diamond (PCD) tools in cutting carbon fiber reinforced plastics (CFRP) for aircraft structure, *Procedia CIRP*, Vol. 1, pp.178-183, 2012.

- [15] 異種積層材向け PCD(多結晶ダイヤモンド)微細複合工具成形技術の開発, 平成 27 年度戦略的基盤事業高度化・連携支援事業 戦略的基盤技術高度化支援事業 研究開発成果報告書, 関東経済産業局製造産業化, 2016 年 3 月発行,
<https://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/portal/seika/26fy.htm>, (参照 2019-05-12).

第3章 ガラス樹脂積層材用 PCD 工具の開発

第3章ではガラス樹脂積層材を切削するためのPCD工具の開発に関して論ずる。レーザ微細加工技術を活用し、ガラス用切れ刃と樹脂用切れ刃を1本の工具に成形したPCD工具を開発することで、ガラスと樹脂の同時加工を可能とした。背景、目的、方法、結果、考察について記す。

3-1 背景

ガラス樹脂積層材 [1] は軽くて割れないガラスとして、注目されている。ガラス樹脂積層材の構成を Fig.3-1 に示す。しかし、硬脆材料であるガラスと粘弾性材料である樹脂では加工特性が全く異なることから、従来のガラス加工や樹脂加工のそれぞれの技術では同時加工が困難である。そこで1本の工具にガラスを加工出来る刃と樹脂を加工できる刃を成形することで、ガラスと樹脂の同時時に加工出来る工具を、レーザ微細加工技術を用いて開発した。

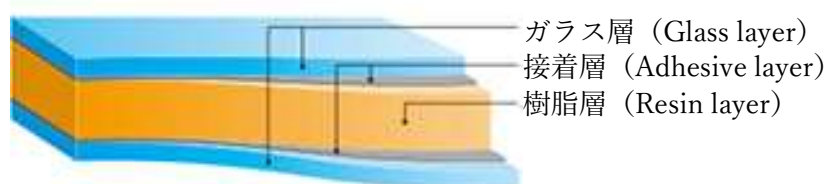


Fig.3-1 Glass resin laminated material.

引用 <https://www.neg.co.jp/rd/topics/product-lamion/> より一部編集

携帯情報端末のカバー材、太陽電池パネル、自動車部品等においてガラス樹脂積層材はお応用と展開が期待されている。軽くて割れないガラス樹脂積層材はガラス代替材料として注目されている。この材料は Fig.3-1 のように樹脂板を薄板ガラスでサンドイッチした構成であり、Fig.3-2 のように高い耐衝撃性を有している。

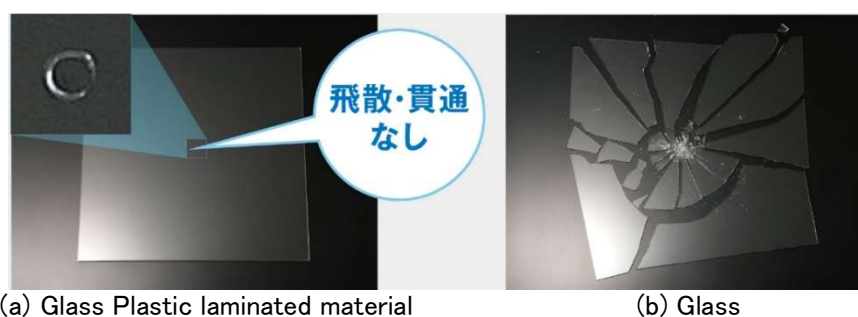


Fig.3-2 Results of a test in which 130 g of a rigid ball was dropped from a height of 2m
引用 <https://www.neg.co.jp/rd/topics/product-lamion/> より一部編集

また、Table3-3 のように、樹脂やガラスと比較して、耐貫通性やガスバリア製、軽量性等に優位性がある。

Table3-3 Characteristics of glass resin laminate.
引用 <https://www.neg.co.jp/rd/topics/product-lamion/>より一部編集

	ガラス樹脂積層材	樹脂	ガラス
軽量化	○	○	×
耐衝撃・耐貫通性	◎	◎	×
遮音性	◎	○	×
耐擦傷性	◎	×	○
ガスバリア性	◎	×	◎
フレキシブル性	○	◎	×
難燃性	○	×	◎
曲げ剛性	○	×	◎
帯電性	○	×	○
耐候性	◎	×	○
質感	◎	×	◎

3-2 目的

ガラスと樹脂を同時に切削することは困難である。樹脂は成型や切削で加工されるが、樹脂用工具によるガラスの加工は、加工温度の違い等により困難である。切削によりガラスを加工すると Fig.3-4 のように、大きなカケが発生する。

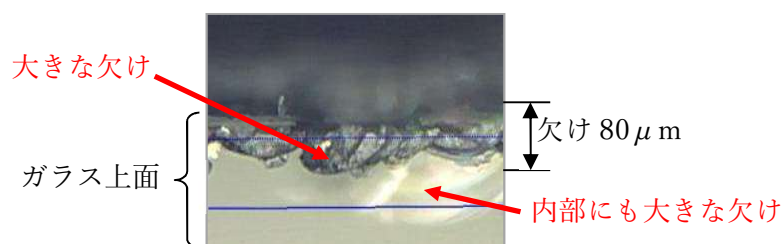


Fig.3-4 Cutting surface of glass with cutting tool.

一方、ガラスの加工方法としてスクライブ加工、ウォータージェット加工、レーザ加工、研削加工等がある。ガラス用工具による研削加工では、溶けや焼け、目詰まり等が発生する [2] ため、樹脂の加工は困難である。研削により樹脂を加工すると、Fig.3-5 のように溶けが発生する。

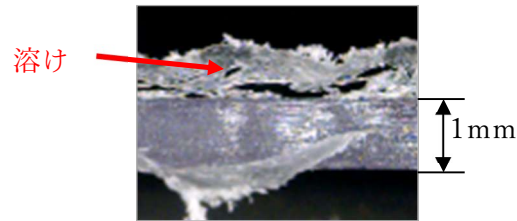


Fig.3-5 Cutting surface of resin with grinding tool.

これらの理由により、工具開発以前はガラスと樹脂を別々に切り抜いてから貼り合わせる方法が取られている。貼り合わせ工程の効率化や貼り合わせ精度の向上等が課題であり、生産性の高い切り抜き方法が求められている。

3-3 方法

1本のPCD工具にガラス刃と樹脂刃を成形すれば、ガラス樹脂の同時加工が可能になる。そこで、開発した超短パルスレーザー工具成形機による微細加工技術を応用し、1本の工具の中に多数枚のガラス刃とシャープエッジの樹脂刃を成形することを試みた [3] [4] [5]。Fig.3-6 は材料と工具の関係であり、上下ガラス層 0.1 mm、樹脂層 0.35 mm の板厚 0.55 mm のガラス樹脂積層材に対し、直径 $\phi 2$ mm の PCD エンドミルを設計した。

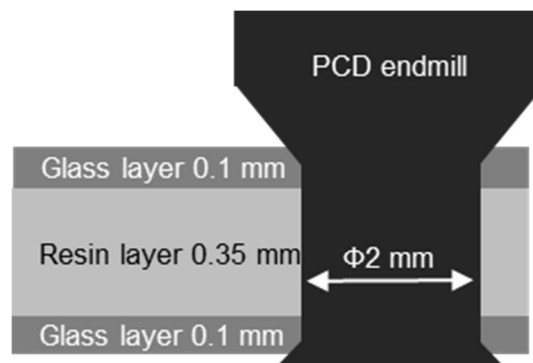


Fig.3-6 Target material and experimental PCD endmill.

3-4 結果

3-4-1 切りくず排出性を考慮した設計

直径 2 mm、ガラス刃 16 枚刃、樹脂刃 1 枚刃の Fig.3-7 のような工具を試作した。

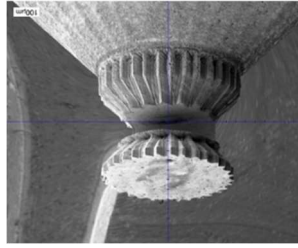


Fig.3-7 PCD end mill.

板厚 0.35 mm の樹脂の上下を板厚 0.1 mm のガラスで重積した 0.55 mm のガラス樹脂積層材の切り抜き試験を行った。

ガラスを切削するには一刃当たりの送りを 0.5 μ m 以下にする必要がある [6], 主軸回転数 60,000 rpm, テーブル送り速度 100 mm/min (周速 377 m/min, 一切れ刃あたりの送り 0.1 μ m/刃) とした。Table3-8 のような切削条件により切り抜き試験を行った。

Table3-8 Cutting parameters.

Workpiece	Glass Plastic laminated material 0.55 mm
Tool diameter	ϕ 2 mm
Tool pitch for glass	16 pitch
Spindle speed	60,000 rpm
Cutting speed	377 m/min
Feed rate	100 mm/min
Lubrication	Emulsion

この際、切削後は、Fi.g.3-9 のように工具と治具の溝にも樹脂の切りくずが残留し、仕上げ面には樹脂層の溶着とガラス層の割れが観察されている。本来、上下ガラス層の切削においては、単位時間当たりの送りを高くするために切れ刃数を増やすことが望ましいが、刃溝の間隔が狭くなり切りくずの排出性が悪化する。そこで、樹脂層切削用切れ刃に対しては切りくず排出性の向上を、ガラス切削用切れ刃ではガラスの脆性損傷が生じない最小切れ刃数を検討した。

切削後は Fig.3-9(a) のように工具に切りくずが溶着し、Fig.3-9(b) のように治具の溝にも切りくずが残留し、仕上がり面には樹脂層の溶けとガラス層の割れが激しく発生した。

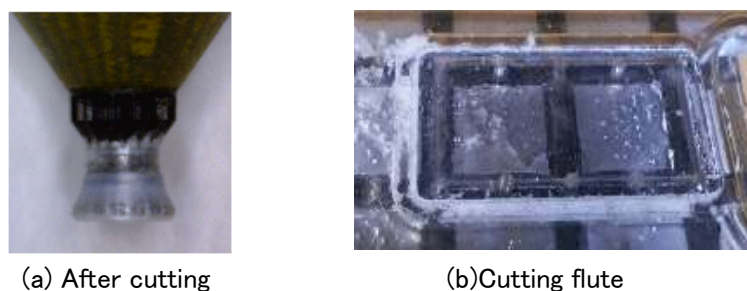


Fig.3-9 Early in tool development.

この結果では、本来、上下ガラス層の切削においては、単位時間当たりの送りを高くするために切れ刃数を増やすことが望ましいが、刃溝の間隔が狭くなり切りくずの排出性が悪化する。そこで、樹脂層切削用切れ刃に対しては切りくず排出性の向上を、ガラス切削用切れ刃では、ガラスの脆性損傷が生じない最小切れ刃数を検討した。切りくずの排出性を高めるために、Fig.3-10のように工具中央部下方より中央部に穴を設け、さらに下面には切りくずが円滑に排出できるように溝を付けた工具を成形した。

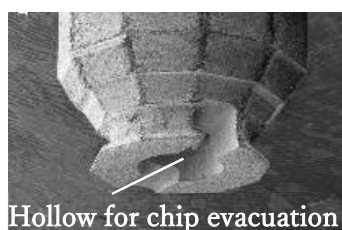


Fig.3-10 PCD end mill.

Fig.3-11(a)(b)はこの工具で切り抜き加工をした切れ刃の状況と治具の切りくず残留状況である。工具に対しては切りくずの溶着が抑制され、治具の溝には切りくずの詰まりが低減した。

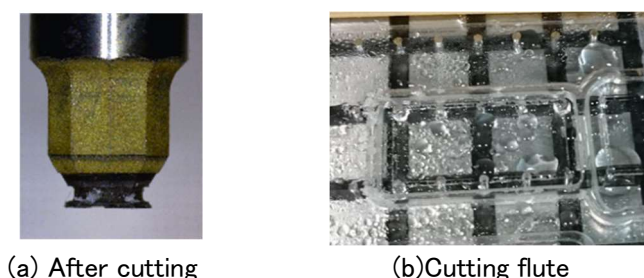


Fig.3-11 Improved chip discharge.

3-4-2 ガラス層切削用最小切れ刃数のシミュレーション結果

ガラス樹脂積層材におけるガラス刃の最適刃数をシミュレーションにより導出した。単

一切れ刃でガラスを切削した時の切削力波形に基づいて、複数切れ刃の切削力変動を切削シミュレーション [7] [8] を用いて計算した。Fig.3-12 は 10~13 枚刃における切削力をシミュレーションした結果である。

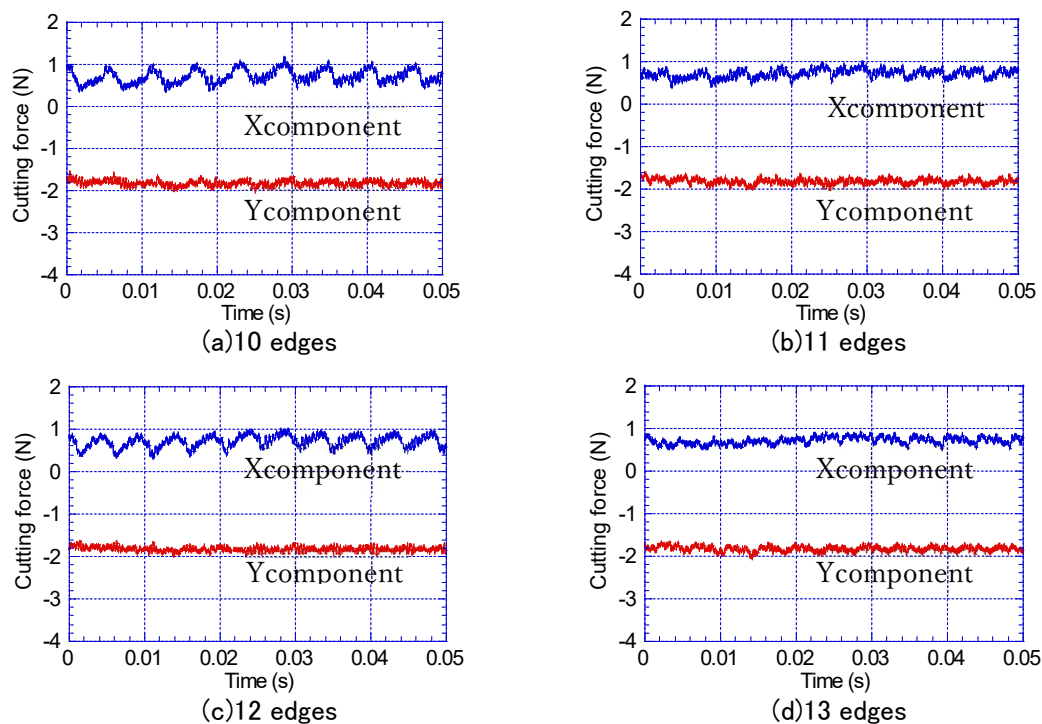


Fig.3-12 Cut simulation

Fig.3-12 のシミュレーション結果によれば、13 枚刃が最も振動が少なく脆性損傷の抑制が期待できるが、Fig.3-9 のように切りくずの排出性が悪く、き裂伝播領域が大きくなる。

さらに、これらの工具を試作して切削試験を行った。Fig.3-13 は各切れ刃数においてガラス表面におけるき裂伝播領域を示したものである。

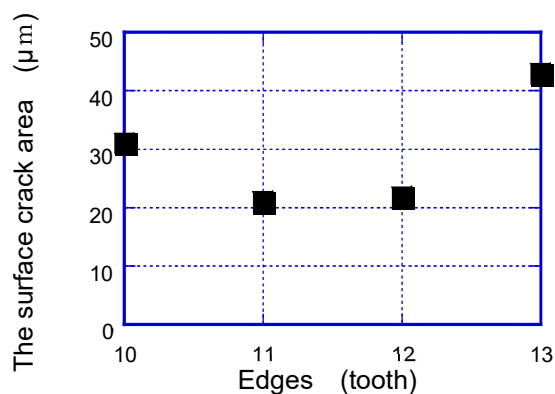


Fig.3-13 Experimental results of milling.

11 枚刃と 12 枚刃はき裂伝播領域が小さく，さらに Fig.3-12 のシミュレーション結果では，11 枚刃は切削力振動が少なく安定した切削が期待できる．以上の考察により，ガラス切削用切れ刃の刃数は 11 枚が最適との結論を得た．

3-4-3 開発工具の切削特性

切りくず排出性を考慮した設計と導出したガラス刃の最適刃数により，ガラス樹脂積層材用 PCD 工具を開発した．3-5-2 のガラス切削用切れ刃の刃数は 11 枚が最適との結論をもとに開発された工具が Fig.3-14 である．

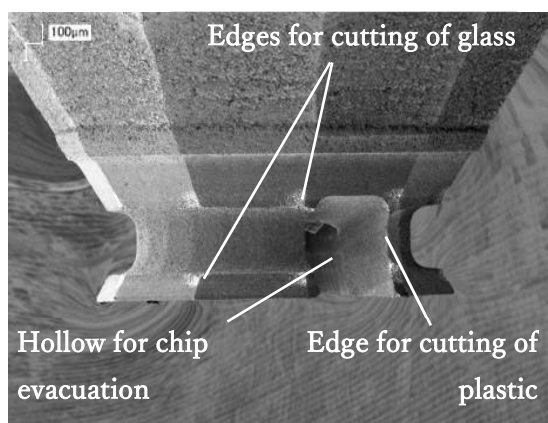


Fig.3-14 Multi-edges PCD end mill.

Table3-15 の切削条件にて切り抜き加工を行った．

Table3-15 Cutting parameters.

Workpiece	Glass Plastic laminated material 0.55 mm
Tool diameter	ϕ 2 mm
Tool pitch for glass	11 pitch
Spindle speed	60,000 rpm
Cutting speed	377 m/min
Feed rate	100 mm/min
Lubrication	Emulsion

その結果，Fig.3-16 のような仕上がり面を得た．ガラス層についてはき裂伝播領域の最大値が 10 μ m 以下で，樹脂層の仕上げ面では溶融，溶着のない良好な仕上げ面が得られた．

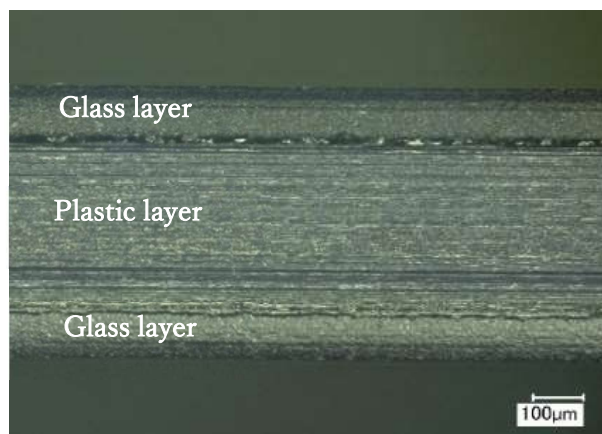


Fig.3-16 Surface finish.

3-5 考察

ガラスと樹脂の同時加工を可能とする工具の開発を行った。必要とされる技術は樹脂切削技術とガラス切削技術、さらには微細複合工具を製作するためのレーザ加工技術であった。

樹脂切削技術では、工具に切りくず排出溝を設けることで、樹脂の切りくずの詰まりを改善した。ガラスと樹脂を同時に切削すると、ガラスの切りくずを含む樹脂の切りくずが発生する。その切りくずが切削中に材料と工具の間に詰まると、工具の破損に繋がる。よって、切りくずの排出性は工具寿命に大きく影響すると考えられる。しかし、排出溝は微細な形状のため、放電加工や砥石研削の従来技術では成形できない。そこで、レーザによる微細加工技術を用い、排出溝を成形することで、切りくず排出性を向上させた。排出性向上には、切削液の流れを考慮し、切りくずを上から下方向に流す設計したことが大きく影響したと考えられる。また、樹脂刃の刃先創成にもレーザ加工技術を適用した。ガラス刃とガラス刃の間に樹脂刃を成形するため、放電加工や砥石研削では成形ができない。そこで、IR レーザにより形状を成形し、UV レーザにより刃先を仕上げることで、樹脂刃を創成した。

ガラス切削技術においては、ガラスのカケをおさえるためのガラス刃の刃数の選定が重要であった。ガラス切削において、刃数は多いほどカケは少なくなるが、切りくずの排出性が悪くなる。刃数が少ないと、切りくずの排出性は良くなるが、カケが多くなる。そこで、最適な刃数を選定するために、切削シミュレーションにより切削力の振動を計算した。予想通り刃数が多いほど、振動が少ない結果となった。しかし、刃数は偶数よりも奇数の方が、振動が少ないことがわかった。これは、工具の固有振動数の影響と考えられる。奇数の場合、振動を打ち消す方向で力が働いたためと考えられる。切削試験による確認実験では、ガラス刃は13枚刃以上では切りくずの詰まりが確認された。この結果、最適なガラス刃の刃数は11枚と選定した。切削シミュレーションによる予想と切削試験による確認実験を組み合わせることで、効率的な工具開発に繋がると考えられる。

微細複合工具を製作するためのレーザ加工技術においては、樹脂を切削するための鋭利な刃先の創成とガラス刃用多数枚刃を 1 本の工具内に成形するための微細なレーザ加工技術が重要であった。ガラス刃は直径 $\phi 2\text{mm}$ の中に、11 枚刃の成形を行った。従来技術では、2~4 枚刃が限界であったことから、レーザ加工技術を適用した効果は大きいと考えられる。

工具設計値と切削条件を最適化する際には、品質工学を用い、開発の効率化を図った。刃の形状や刃数等の工具の設計値と、回転数や送り速度、切込量等の切削条件を因子とし、SN 比を求めることで、影響度の高い因子を割り出し、ポイントを絞った工具開発を行えたことが、開発期間を短縮できた大きな要因と考えられる。

3-6 まとめ

第 3 章ではガラス樹脂積層材を切削するための PCD 工具の開発に関して論じた。レーザ微細加工技術を活用し、ガラス用切れ刃と樹脂用切れ刃を 1 本の PCD 工具の中に成形することに成功した。ガラスが欠けない刃数の選定し、樹脂の切りくず排出性を高めた構造を採用した結果、ガラスと樹脂の同時加工を可能とした。

第 3 章の参考文献

- [1] 日本電気硝子 HP, <https://www.neg.co.jp/rd/topics/product-lamion>, (参照 2019-05-26).
- [2] 小倉一郎, 岡崎祐一, シングルポイントダイヤモンド旋削による光学ガラスの延性モード切削加工に関する研究, 精密工学会誌, Vol.66, No.9, pp.1431-1435, 2000.
- [2] 松村隆, 大野威徳, 高橋勇助, 小径ボールエンドミルによる石英ガラスの切削特性, 2005 年度精密工学会学術講演会講演論文集, p.637-638, 2005
- [3] 内山文宏, ガラス樹脂積層材加工用工具の開発(特集 切削工具が拓く新しい加工技術), 機械と工具, Vol.8, No.3, p.16-20, 日本工業出版, 2018.
- [4] 内山文宏, 楠本利行, 坪井昭彦, 松村隆, ガラス樹脂積層材切削用の PCD 小径エンドミルの開発, 2016 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2016)講演論文集, p.41-42, 2016.
- [5] 異種積層材向け PCD(多結晶ダイヤモンド)微細複合工具成形技術の開発, 戦略的基盤事業高度化支援事業 研究開発事例集, 平成 25 年度～平成 26 年度採択事業, 関東経済産業局製造産業化, p.82-83, 2016 年 3 月発行.
- [6] Matsumura, T., Hiramatsu, T., Shirakashi, T, A study on cutting force in the milling process of glass, Journal of Manufacturing Processes, 7, 2, pp.102-108, 2005.
- [7] 松村隆, 切削シミュレーションの応用と微細切削への展開, 精密工学会誌, Vol.76, No.8, pp.867-870, 2010.
- [8] 松村隆, 切削シミュレーションの現状と課題, 精密工学会誌, Vol.80, No.9, pp.803-806, 2014.

第4章 軟質樹脂用 PCD 工具の開発

第4章では軟質樹脂を切削するためのPCD工具の開発に関して論ずる。レーザ微細加工技術を活用し、チップブレイカと呼ばれる微細な溝を工具に施すことにより、切りくず排出性が向上し、溶けやすい軟質樹脂の切削を可能とした。背景、目的、方法、結果、考察について記す。

4-1 背景

ポリカーボネート等の軟質樹脂の需要が高まっている。Fig.4-1のようなカーナビゲーションシステムのタッチパネルでは、カバー材としてポリカーボネート等の軟質樹脂が採用されている [1]。スマートフォン等の携帯情報端末のカバー材はガラス製が一般的であるが、車載用では破損のリスクから樹脂製が主流となっている。樹脂の中でも耐衝撃性と透明性に優れたポリカーボネートが広く使われている。



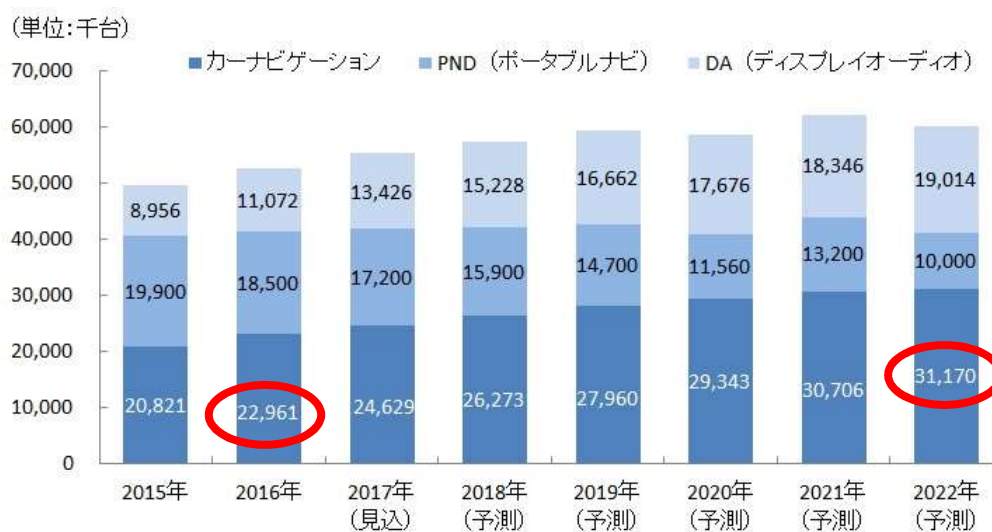
Fig.4-1 Car navigation panel.

引用 <https://cobby.jp/carnavi-recommended.html>

しかし、軟質樹脂は溶けやすく、切りくずが詰まりやすいため、切りくずが加工面と刃先の間で挟まり込むことで加工面品位の低下や工具寿命の低下が問題となっている [2]。近年は表面に高硬度なコーティングを施したアクリル板との貼合せ材が増え、高硬度材と軟質材の複合材は樹脂といえども難削材と言える。この材料に対して、レーザ加工を用いてPCD工具にチップブレイカ加工を施すことにより、切りくず排出性を改善し、軟質樹脂の切削性を向上させた。

矢野経済研究所の「2017年度版 カーナビ/DA/スマホナビ/ITS車載機市場予測」によれば、2016年のカーナビ世界市場規模は前年比10.3%増の2296万1000台である [3]。自動車販売台数の拡大に合わせて伸長している。自動車の魅力向上にインフォテインメントシステムが果たす役割が大きくなっており、カーナビはその代表的な存在である。今後、

世界の自動車市場においてカーナビを含むインフォテインメントシステムの重要性がさらに



高まっていく。Fig.4-2 のように 2022 年の世界カーナビ市場規模は、2016 年比 35.7% 増の 3117 万台に拡大すると予測されている [4]。

Fig.4-2 Car Navigation / PND / DA Global Market Trend and Forecast.

引用 <https://www.yanoict.com/summary/show/id/497>

4-2 目的

軟質樹脂の切削では溶けや工具への溶着が発生し、加工面品位の低下が問題となっている。樹脂の切削性は、樹脂材料毎に大きく異なる [5] [6] [7] [8]。アクリルではPCD工具が広く使われているが、ポリカーボネートでは、使われていない。PCDは硬いがゆえに脆いため工具刃先の鋭利化には限界があるためである。鋭利ではない刃先による切削では切削温度が上昇し、Fig.4-3 のような樹脂の溶け、溶着の発生が問題となっている。このため、PCD工具はポリカーボネート等の軟質樹脂への適用が困難であった。



Fig.4-3 Cutting situation clogged with chips.

切削工具として最も一般的に使われる超硬工具もあるが、鋭利な刃先は容易に創成でき

るものの、PCD と比べると工具寿命が 10 分の 1 以下と短く、量産工程には使えない。

以上のように、軟質樹脂の加工面品位向上するために、切りくず排出性の高い PCD 工具の実現が求められている。

4-3 方法

樹脂の溶融改善と切りくず排出性向上を目的として、開発した超短パルスレーザ装置で Fig.4-4 のような PCD 工具のすくい面に微小の溝（チップブレイカ）を設け、その効果を検証した [9] [10]。

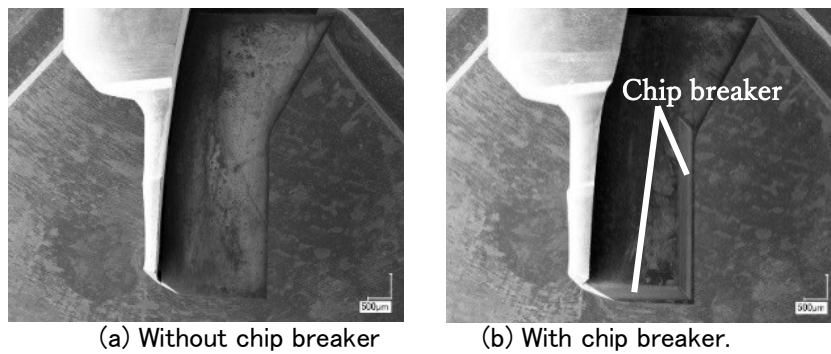


Fig.4-4 PCD endmill for soft resin cut.

4-4 結果

軟質樹脂の切削においてチップブレイカは溶けや溶着対策に効果があることを確認した。外径 3 mm の PCD 工具に対してチップブレイカを施した工具（Fig.4-4(b)）を用い、切削試験を行うことで効果を確認する実験を行った。被削材は板厚 3 mm の成形ポリカーボネート、切削条件は Table4-5 のように主軸回転数 8,000 rpm, テープ送り速度 1,200 mm/min（周速 75 m/min, 1 切れ刃当たりの送り 150 µm/刃）である。Fig.4-6 は切削試験の様子である。

Table4-5 Cutting parameters.

Workpiece	Polycarbonate 3 mm
Tool diameter	ϕ 3 mm
Spindle speed	8,000 rpm
Cutting speed	75 m/min
Feed rate	1,200 mm/min
Lubrication	Dry

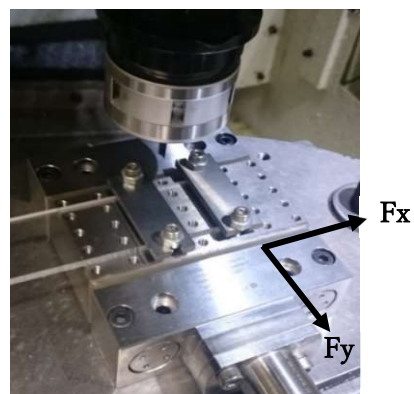


Fig.4-6 Cutting condition.

Fig.4-7 はその時の切削力を表している。切削力の測定は圧電式切削動力計（日本キスラー社製多成分小型動力計：9119AA1）を用いた。工具進行方向を Y (F_y) の正とし、これに対して左側を X (F_x)、軸方向を Z (F_z) として表示している。切削力の最大値が減少し、チップブレーカによる切削力の低減効果が確認できる。また、空転時の切削力変動の減少から、切りくずの巻き込みが抑えられていると考えられる。

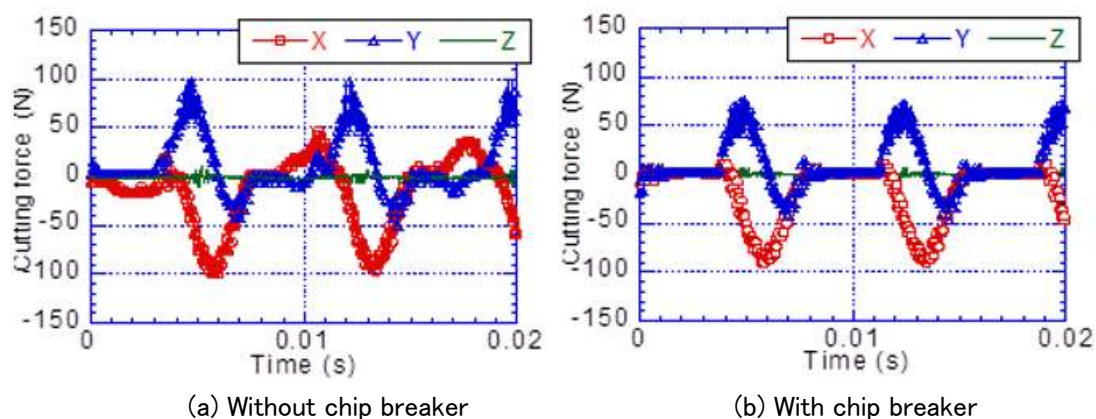


Fig.4-7 Comparison of the cutting force.

Fig.4-8 は切削力の X, Y 成分を示したものであり、原点から各点に対する距離が X と Y の切削合力である。同図における軌跡の変動は切りくずの噛み込みに起因するものと考えられ、チップブレーカ付の工具は変動が少なく安定した切削状態になっている。

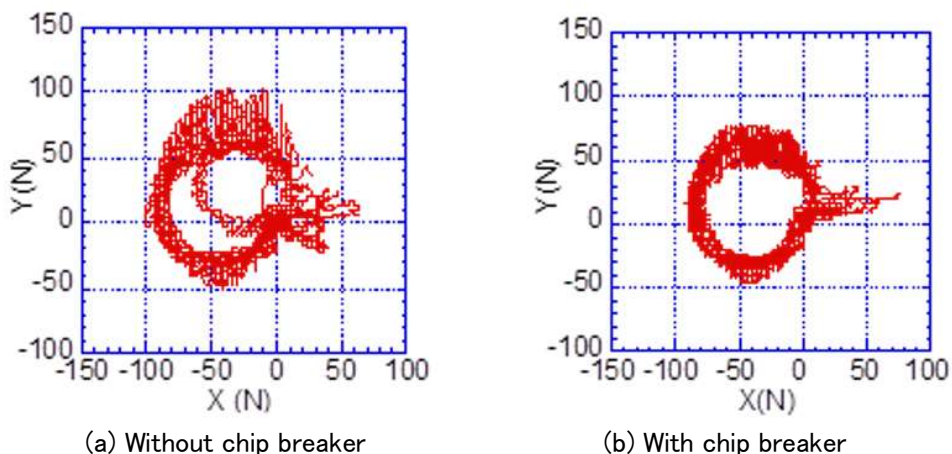


Fig.4-8 Distribution of cutting force.

Fig.4-9 はチップブレーカの有無における切削力を比較したものであり、X 方向（進行方向に垂直な方向）では 9 %、Y 方向（進行方向）では 20 %減少している。

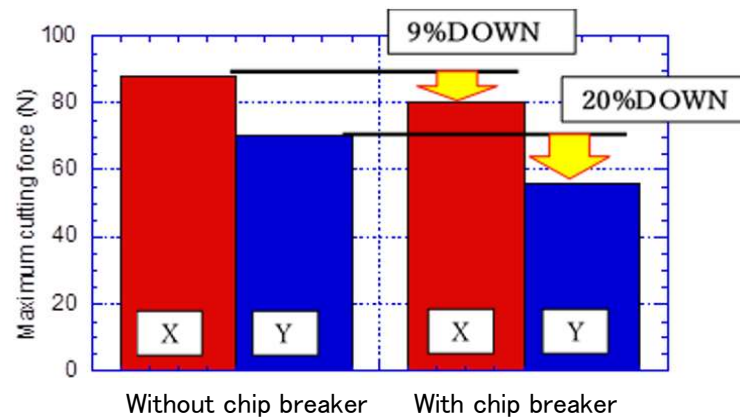


Fig.4-9 The reductional effect of cutting force.

Fig.4-10 は切削した切りくずを撮影し比較したものである。チップブレーカにより、切りくずがカールした形状となっており、カールすることにより慣性力が働くため、切りくず排出性が向上していると考えられる。

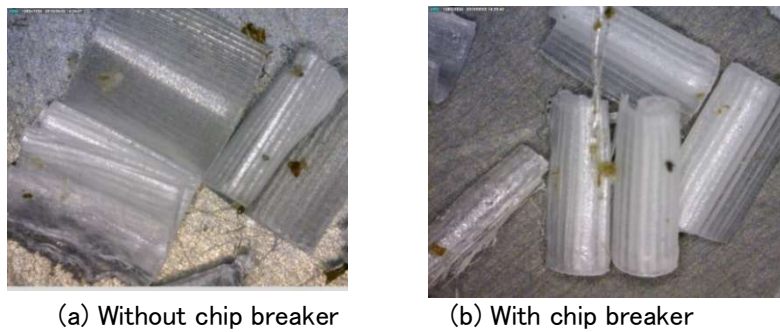


Fig.4-10 Comparison of chip.

Fig.4-11 は切削力を周波数解析し比較した結果である。7kHz あたりに発生していた振動のピークが減少しており、振動を低減する効果があると考えられる。

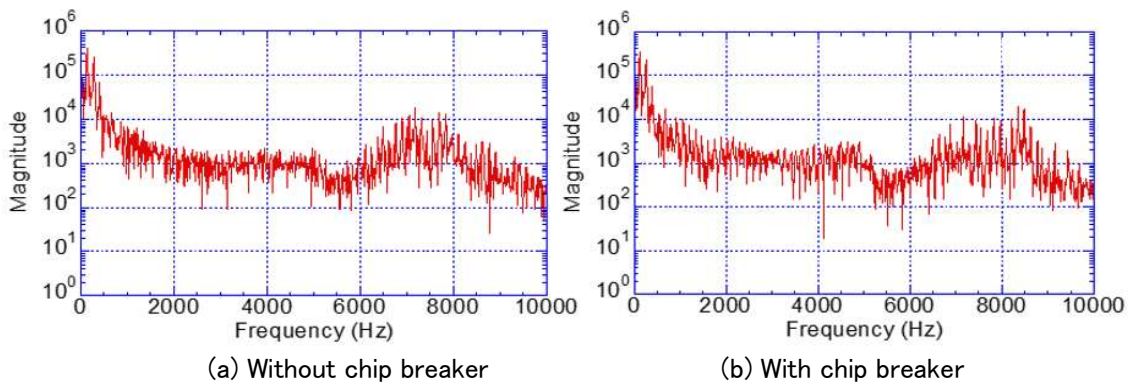


Fig.4-11 FFT analysis result.

次に、ハイスピードカメラにて切削中の切りくず生成過程を直接観察することを試みた。使用した工具は従来工具（チップブレーカの無い超硬製すくい付き(Fig.4-12(a))）と開発工具（チップブレーカを施した PCD 製すくい無し工具(Fig.4-12(b))）を用いた。切削条件は Table4-13 に示す。



(a) WC end mill without chip breaker (b) PCD end mill with chip breaker

Fig.4-12 Cutting test tool.

Table4-13 Cutting parameters.

Workpiece	Polycarbonate 3 mm
Tool diameter	ϕ 3 mm
Spindle speed	12,000 rpm
Cutting speed	113 m/min
Feed rate	1,000 mm/min
Lubrication	Dry

Fig.4-14 はハイスピードカメラ（フォトロン製高速度カメラ：FASTCAM-SA4）にて切削中の様子を撮影し、動画をキャプチャーしたものである。



(a) WC end mill without chip breaker

(b) PCD end mill with chip breaker

Fig.4-14 The effect of the chip breaker by observation of a high-speed camera.

従来の工具は切削溝に切りくずが詰まり、切りくずを巻き込みながら回転している。一方、チップブレイカ付 PCD 工具では工具 1 回転ごとに切りくずが飛散し、加工溝内に切りくずが残らないことがわかる。これは刃先から発生した切りくずがチップブレイカの溝に沿ってカーブすることにより、飛散しやすくなっているためと考えられる。なお、切削条件により切りくず生成状態が変わり、それが切りくず排出性に影響するため、工具の使用条件に合わせたチップブレイカ形状を設計することが必要である。

4-5 考察

レーザー微細加工技術を活用して、PCD 工具にチップブレイカを施し、切りくず排出性が向上することで、PCD 工具による軟質樹脂の切削を可能とした。一般的な超硬工具において、チップブレイカによる切りくず排出性を向上させる技術はすでに普及している。しかし、超硬工具は工具寿命が短く、長寿命化に課題である。そこで、工具寿命の長い PCD 工具が注目されているが、チップブレイカ処理が困難なため、いまだチップブレイカ付 PCD 工具は普及していない。そこで、PCD 工具にチップブレイカを施す手段として、レーザー加工技術を適用した。チップブレイカ形状は、切削条件による切りくずの大きさ、接触面積を想定し、設計した。チップブレイカ形状の最適化は、切削試験におけるハイスピードカメラによる切りくず排出具合の観察と切削力の測定を併用し行った。直接的な効果の観察と、定量的な効果の比較により、効率的な工具の開発に繋がったと考えられる。切削意見の結果、チップブレイカによる切りくず排出性向上の効果は、切削条件にも依存することがわかった。切削条件を前提としたチップブレイカ形状の設計が必要と考えられる。

今回のチップブレイカ形状はポリカーボネートを対象としたものであり、今後、アルミニウム、銅などの非鉄金属への展開が期待される。

4-6 まとめ

第 4 章では軟質樹脂を切削するための PCD 工具の開発に関して論じた。レーザー微細加工技術を活用することで、チップブレイカと呼ばれる微細な溝を PCD 工具に施すことに成功した。切りくず排出性が向上し、溶けやすい軟質樹脂の切削を可能とした。

第 4 章の参考文献

- [1] 三菱エンジニアリングプラスチック HP, <https://www.m-ep.co.jp/ja/eve/4-1.html>, (参照 2019-05-22).
- [2] 静弘生, 酒井克彦, 栗田雄旭, 内山文宏, 樹脂の切削加工における段付き逃げ面工具の効果, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, p.127-128, 2017.
- [3] 株式会社矢野経済研究所 HP, https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/1789, (参照 2019-05-22).
- [4] 株式会社矢野経済研究所 HP, カーナビ世界市場に関する調査を実施(2017 年), <https://www.yanoict.com/summary/show/id/497>, (参照 2019-05-22).
- [5] Malak, S., and Anderson, I., Orthogonal Cutting of Polyurethane Foam, *International Journal of Mechanical Science*, Vol.47, pp. 867-883, 2005.
- [6] 小林昭, プラスチック切削における切りくず生成機構, *日本機械学会論文集*, Vol. 30, No. 220, pp. 1467-1475, 1964.
- [7] Wyeth, D., An Investigation into the Mechanics of Cutting using Data from Orthogonally Cutting Nylon 66, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, pp. 896-904, 2008.
- [8] 山本礼, 森田昇, 山岡克徳, ゴム含有軟質コンポジット材の切削現象と切りくずの温度依存性, *日本機械学会論文集(C編)*, Vol.78, No.789, p.1925-1935, 2012.
- [9] 内山文宏, 超短パルスレーザーによる微細成形技術を用いた PCD 小径エンドミルの開発, *機械技術*, Vol.65, No.7, p.69-73, 日刊工業新聞社プロダクション, 2017.
- [10] 内山文宏, 超短パルスレーザーによる PCD 工具成形技術の開発: 小規模企業の産学官連携事例, *レーザー加工学会誌*, Vol.24, No.3, p.178-183, 2017.

第5章 ストラクチャ付工具による加工面粗さ制御技術の開発

第5章は、レーザ加工によりストラクチャを付与したPCD工具の実現と、傾斜した工具の回転軸に対する表面性状シミュレーションにより、仕上がり加工面粗さを制御する切削技術に関して論ずる。切れ刃に微細構造（ストラクチャ）を有するPCDエンドミルに対して、工具の回転軸の傾きを考慮した仕上がり加工面粗さの解析モデルを提案し、その妥当性を示す。また、回転軸の傾斜によって、仕上がり加工面粗さが制御できることを明らかにする。ストラクチャ付エンドミルの回転軸を傾斜した切削により、仕上がり加工面プロファイルの人工的制御を可能とする。本章は第2章（PCD工具を成形するためのレーザ加工技術の開発）の成果により、加工面粗さを制御するための微細なストラクチャ成形が可能となった。背景、目的、方法、結果、最大高さあらしマップによる検討、考察について記す。

5-1 背景

近年、切りくず処理性や材料の耐凝着性を向上させるために、周期的な凹凸を成形したストラクチャ付エンドミルが増えている。その代表的例には、切れ刃に周期的な波形状を有するラフニングエンドミルがあるが、これは切りくずを細分するだけでなく、工具の送り方向に対する切削抵抗を低減させることで、安定した深溝加工が可能となっている。最近では、工具の成形技術の発達と微細加工のニーズに伴い、切れ刃にマイクロメートルオーダーで複雑な形状を成形したエンドミルも増えている。しかしながら、これらの工具で切削した仕上がり加工面粗さに関して、それを解析した例は少ない。

すくい面や逃げ面に形成されるストラクチャ付工具は、近年、旋削およびフライス加工における切削性能の改善を目的として研究されている。Fig.5-1は切削加工における2次元切削モデル(2D Cutting Model)である。すくい面とは切りくずをすくい取る面であり、逃げ面とは被削材に接しない面のことである。

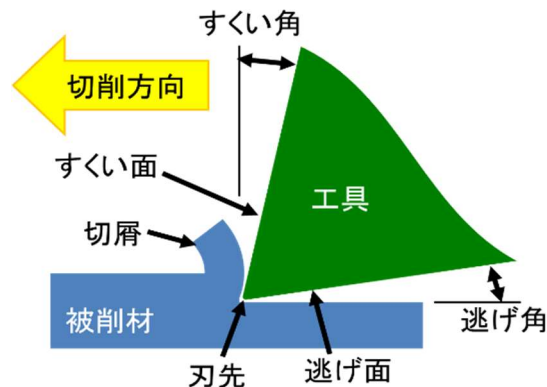


Fig.5-1 2D Cutting Model.

すくい面に施されたストラクチャは摩擦係数の低減が期待される[1][2]。また、切りくずと工具面の間の界面におけるトライボロジー特性により、ワーク材料の付着を減らすことも可能である[3][4][5]。さらには工具寿命の向上にも効果的である[6][7]。一方、逃げ面に施されたストラクチャは、逃げ面と加工面之间に切削液が浸透することで冷却効果を促進する[8]。これらのストラクチャ付工具の研究では、溝のサイズ、幅、方向、およびパターンを切削力や工具の摩耗などの性能と関連付けられている。ストラクチャパターンの大部分は、超硬工具または被覆工具の工具面上に製作されてきた。したがって、摩擦が減少するなどの表面機能は、工具が磨耗するにつれて減衰するため、機能を維持することが課題である。

従来の切削加工におけるストラクチャ付エンドミルは、Fig.5-2(a)のようなラフニングエンドミル(Roughing)と呼ばれるウェーブまたはニック付エンドミル(Nick)(Fig.5-2(b))が、大きな切り込みでの切削に広く使用されてきた。

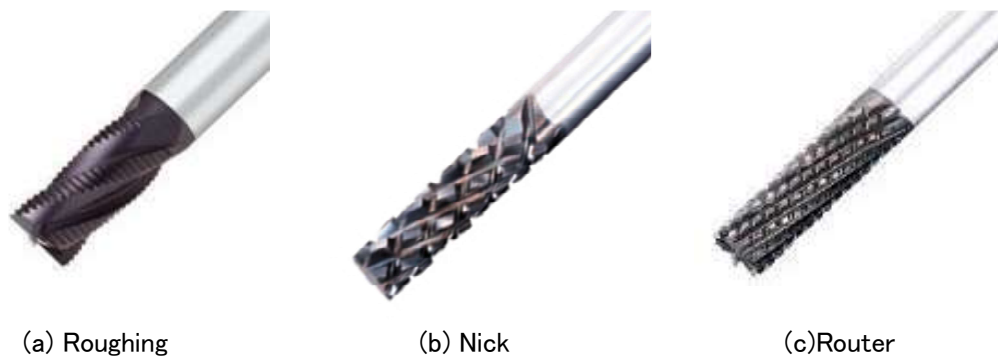


Fig.5-2 Structured end mill.

引用 <https://www.osg.co.jp/products/endmill/>

ラフニングエンドミルは切りくず排出性向上の観点から切りくず分断化に有効であり、送り方向の切削力成分も減少させる。これらの効果は切りくずの流れと切削力の分析で議論されてきた[9]。

CFRPの機械加工では、剥がれ、層間剥離、切断されていない繊維によって表面仕上げが悪化する[10]。Fig.5-2(c)のようなルータービットエンドミル(Router)は最近、CFRPプレートのトリミング加工に使用されている[11]。この工具は、全周に周期的な切れ目があり、刻み目は軸方向および半径方向に傾斜しているため、繊維は積層体層に対して傾斜した方向に切断される。したがって、表面の損傷は、エッジの周期的な切れ目によって制御される。

ストラクチャ付エンドミルの切削は、仕上がり加工面にストラクチャ形状が転写されるため、仕上がり加工面品位の向上が課題である。これまでに多くのストラクチャ付工具が開発されてきたが、仕上がり加工面形状は工具エッジ形状に対応して形成される。したがって、表面仕上げは一般的にエンドミルの直線エッジの仕上げよりも悪くなる。Fig.5-3はラフ

イングエンドミルによって工具波目模様が仕上がり加工面に転写された様子である。



Fig.5-3 Cutting surface by roughing end mill.

引用 <http://nachi-tool.jp/blog/index.php?e=110>

切削加工における表面形状解析については多くの研究がなされている[12] [13]. 旋削加工における表面仕上げは、スペクトル解析を使用して予測された[14]. フライス加工における表面仕上げも、切削パラメータに対してモデル化された[15]. これらの研究は比較的簡単な切削加工に焦点が当てられてきた. しかし、実際の切削加工では、難削材の切削に使用されている複雑な形状の工具を、多軸制御の工作機械にて使われる回転軸の傾斜による表面分析でモデル化する必要がある.

5-2 目的

本章の目的は、ストラクチャ付工具を用いて工具回転主軸を傾斜することにより、荒取と仕上げに分けることなく 1 回の切削加工で加工面を仕上げるための加工面粗さを制御する技術を確立することである.

従来技術により成形されたストラクチャ付エンドミルによる加工面粗さは $100\mu\text{m}$ 程度が限界である. PCD 工具へのストラクチャ成形において、従来技術である放電加工や砥石研削では、電極や砥石形状に依存するため、ピッチ $100\mu\text{m}$ 以下の微細なストラクチャの成形は困難である. よって、その工具により切削した加工面は、刃先のストラクチャ形状が転写されるため、従来技術により成形されたストラクチャ付エンドミルによる加工面粗さは $100\mu\text{m}$ 程度が限界である. そこで本章の目標は、切削条件を変えるだけで、加工面粗さを数 μm から数十 μm の間で任意に制御できる工具形状と切削条件の選定技術の確立とする.

5-3 方法

5-3-1 レーザ加工によるストラクチャ付工具の成形

ストラクチャの成形には第 2 章の PCD 工具を成形するためのレーザ加工技術を用いた. 加工面を仕上げるためや機能性を付与するためには加工面粗さを少なくとも数十 μm 以下

に制御することが必要である。そのためにはPCD工具のストラクチャ形状はピッチ $50\mu\text{m}$ 以下にする必要がある。また、切削時における材料の塑性変形による加工面品位への影響を減らすために、刃先丸みは $1\mu\text{m}$ 以下となることが必要である。ピッチ $50\mu\text{m}$ 以下、刃先丸み $1\mu\text{m}$ 以下のストラクチャは、従来のPCD工具成形技術では成形できないため、そこで第2章のレーザ加工による工具成形技術の適用が必須となる。第2章にて最適化したUVピコ秒レーザの照射条件を用いた。その結果、Fig.5-4のようなピッチ $50\mu\text{m}$ 、刃先丸み $1\mu\text{m}$ のストラクチャ付PCD工具の成形に成功した。

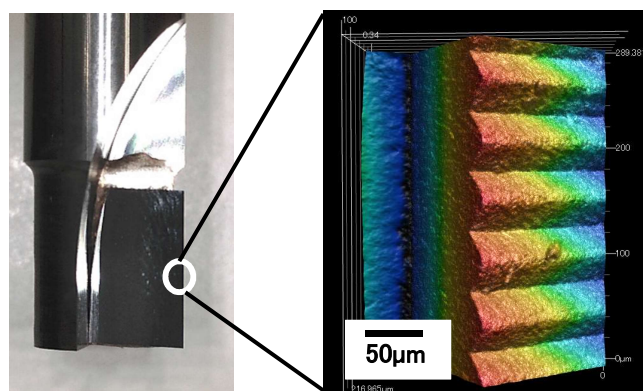


Fig.5-4 Structured PCD end mill (Diameter $\phi 6\text{mm}$) formed by laser processing.

5-3-2 仕上げ加工面プロファイルモデル

本章は仕上げ加工面プロファイルをシュミレーションし、刃先のストラクチャ形状、切削条件、および回転軸傾斜に対する表面粗さを推定するための解析モデルを提示する。そして、回転軸の傾斜角度における主軸回転数と送り速度とについて表面粗さマップを作成する。切削試験は表面粗さを測定しながら表面形状モデルを検証する。工具の摩耗によるストラクチャ形状の変化の影響を排除するために、マイクロスケール構造を付与した多結晶ダイヤモンド工具を製作した。表面粗さは表面粗さマップが示唆するように、切削パラメータと共に変化した。

Fig.5-5 のように単純なニックを有するエンドミルの切れ刃を対象とし、その形状をニックのピッチと角度で定義する。

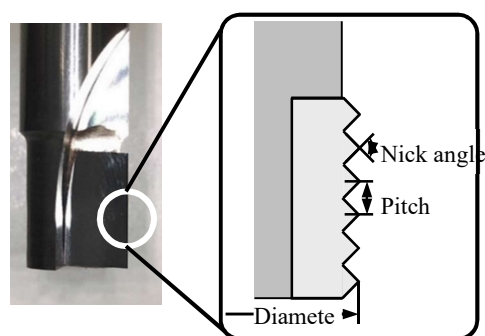


Fig.5-5 Edge parameters of end mill.

Fig.5-6 のようにマシニングセンタ上で治具を介して工具の回転軸を傾斜させ、片側側面切削のアップカットにおける仕上げ加工面粗さを解析する。

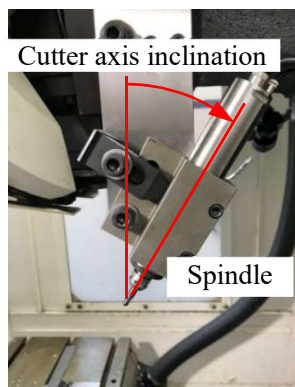


Fig.5-6 Cutting operation with inclined spindle.

5-3-3 ストラクチャ付工具によるフライス加工における回転軸傾斜の影響

垂直回転軸におけるストラクチャ付工具のフライス加工における表面生成機構を Fig.5-7 に示す。

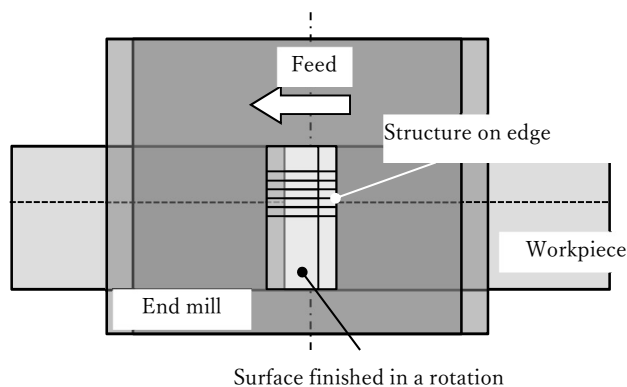


Fig.5-7 Milling with a vertical spindle.

垂直回転軸によるフライス加工では、刃先の各ニック部分が互いに重ならず、回転半径に対応してニックの逆形状がコピーされる。

Fig.5-8 は傾斜回転軸におけるストラクチャ付工具のフライス加工における表面生成機構を示したものである。

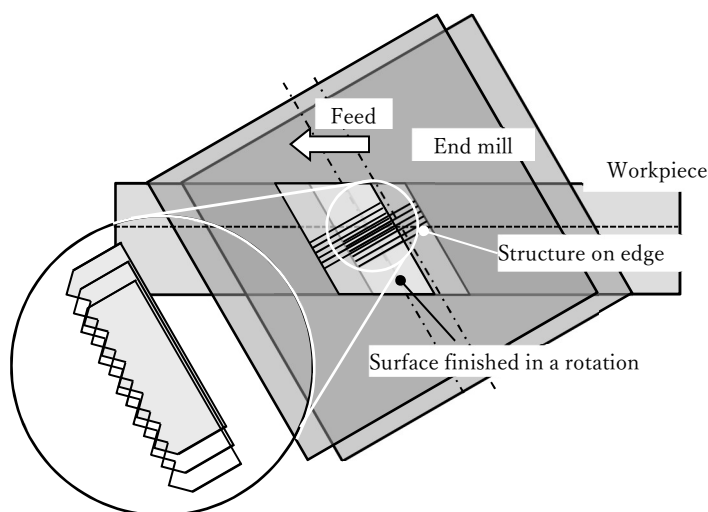
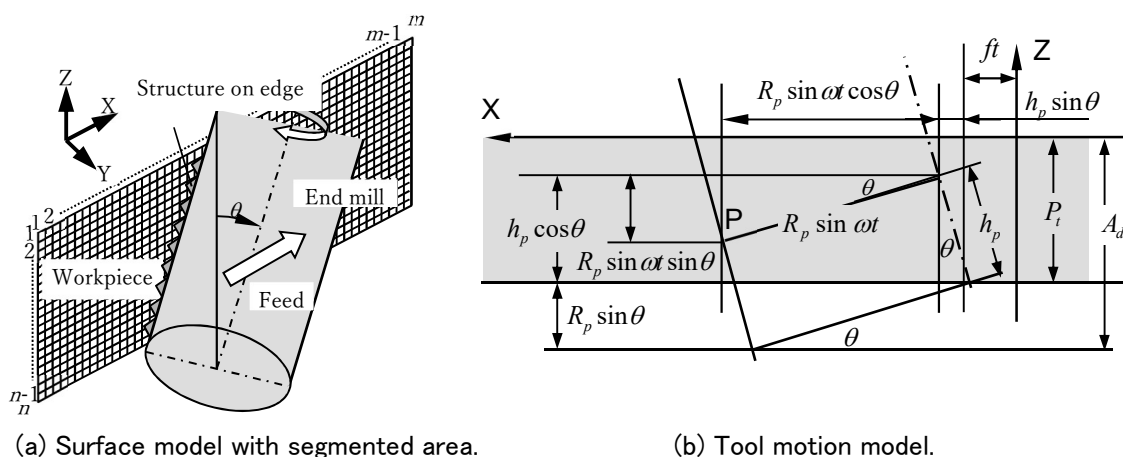


Fig.5-8 Milling with an inclined spindle.

傾斜回転軸によるフライス加工では、エッジの高さは前の回転におけるエッジの高さと重なって表面を仕上げる。したがって、ある高さの表面は、エッジのさまざまな高さで仕上げられる。回転軸が傾斜しているとき、表面形状および最大表面粗さは縁部の構造の重なりによって制御することができる。

5-3-4 表面形状の解析モデル

仕上がり加工面プロファイルの解析モデルを Fig.5-9 に示す。同図(a)を左側から見た図が同図(b)である。



(a) Surface model with segmented area.

(b) Tool motion model.

Fig.5-9 Analytical model.

X 軸と Z 軸はそれぞれ送り方向と板の厚み方向であり、Y 軸は送り方向に向って右手側を正とする座標系である。したがって、表面のプロファイルは X-Z 平面における y 値で与

えられる。

工具の切れ刃上の点 P における回転半径 R_p を、高さ h_p の関数として定義する。したがって、図 1(a) の切れ刃の形状では、 R_p が h_p に対して周期的に変化する。工具回転軸が角度 θ で送り方向に傾斜し、角速度 θ で回転している場合、切れ刃上の点 P の座標は、時刻 t に対して次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} x_p &= ft + h_p \sin \theta + R_p \sin(\omega t + \gamma) \cos \theta \\ y_p &= R_p \cos(\omega t + \gamma) \\ z_p &= -A_d + R_p \sin \theta + h_p \cos \theta - R_p \sin(\omega t + \gamma) \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし A_d と f は、板厚方向の切込みと送りである。また、複数の切れ刃を有する工具では、それぞれの切れ刃の位置は、基準の切れ刃に対する遅れ角 γ として与える。

解析では、仕上げ面の解析空間 $x_d \times z_d$ を X 方向に m 分割、Z 方向に n 分割する。それぞれを仕上げ面となる微小領域 S_{ij} ($i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$) とし、X-Z 平面において、その領域の位置を座標 (x_{ij}, z_{ij}) で代表させる。また、各微小領域の大きさは、次式の dx と dz で与えられる。

$$dx = \frac{x_d}{m}, \quad dz = \frac{z_d}{n} \quad (2)$$

一方、切れ刃についても微小分割し、式(1)において時間 t と高さ h_p を変化させ、分割した切れ刃の座標 (x_p, y_p, z_p) を得る。そして、X-Z 平面における座標 (x_p, z_p) に対して微小仕上げ面 S_{ij} の i と j を次式で得る。

$$i = \frac{x_p}{dx}, \quad j = \frac{z_p}{dz} \quad (3)$$

この時の y_p を S_{ij} の領域 (x_{ij}, z_{ij}) における仕上げ面の高さ y_{ij} とする。ただし、 y_{ij} の初期値を大きくとり、 y_p が y_{ij} より小さいときに、 y_p を y_{ij} として更新する。

5-4 結果

5-4-1 表面形状シミュレーションの結果

シミュレーション結果により、回転軸の傾斜は仕上がり加工面の粗さを改善する。Fig.5-10(a) は Fig.5-7 に示す垂直回転軸を用いたフライス加工における仕上がり加工面プロファイルのシミュレーションを示している。切削条件は回転数 18,000 rpm、送り速度は 1,000 mm / min である。工具切れ刃のニックのピッチと角度は 0.05 mm と 90° であり、ニックの大きさは幾何学的に 25 μ m と計算される。表面粗さの最大ピークは一般に最大表面粗さと見なされ、25 μ m となる。

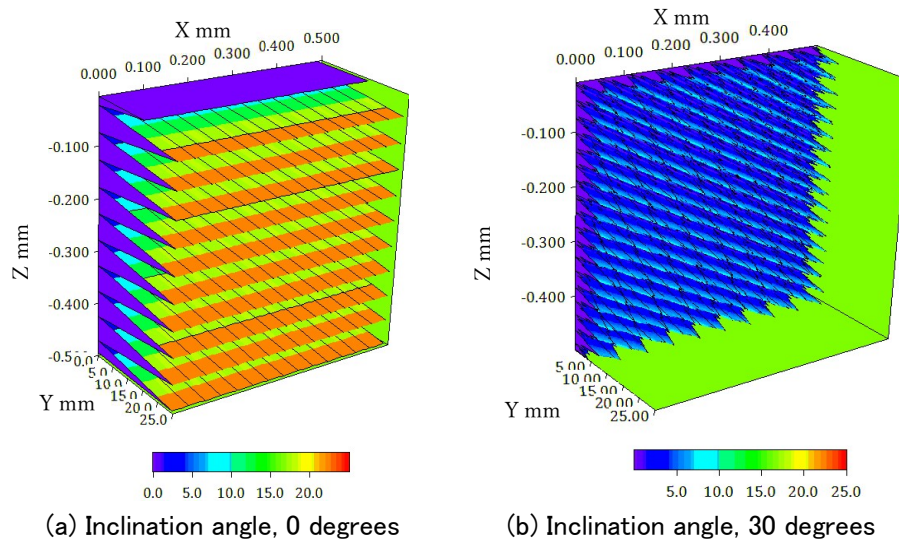


Fig.5-10 Surface profiles.

Fig.5-10(b)は工具回転軸を 30° 傾斜させてフライス加工したときの表面形状を示している。切削および工具のパラメータは Fig.5-10(a)と同じである。最大ピークは $7\mu\text{m}$ 以下となり、垂直回転軸で仕上げられた表面の $25\mu\text{m}$ よりはるかに小さくなる。

シミュレーション結果により、回転軸の傾斜は仕上がり加工面の粗さを改善する。ストラクチャ付エンドミルは、切削効率と切りくず処理の観点から一般的に荒加工に使用される。一方、エッジの形状に応じた表面仕上げは、製品の要件を満たすことができない。したがって、仕上げ加工を追加する必要がある。しかしながら、シミュレーション結果より、回転軸の傾斜が波形形成されたエンドミルを用いたフライス加工における表面仕上げを改善することを表している。

表面トポグラフィによって制御される機能表面に関しては[16] [17]、結果は表面トポグラフィが切削構造とエッジ構造構成のための工具回転軸の傾きによって制御されることを示唆している。機能面の製造において、マイクロまたはメソスケールの表面構造は高い機械加工速度で製造されるべきである。微細加工は、レーザ加工、圧延加工、スタンピング加工で行われる[18] [19] [20]。切削加工もまた潜在的な製造方法である。傾斜スピンドルに固定されたボールエンドミルを用いてフライス削りで平らな表面にマイクロディンプルを製作した[21]。切削パラメータと送り方向についてディンプル形状を分析した[22]。彼らはまた、開発された工作機械のシリンダー表面にマイクロディンプルを製作した[23]。切削における微細加工について多くの研究が行われてきたが、ストラクチャ付工具はこれまで使用されていない。上記のシミュレーションによれば、周期的なトポグラフィを有する機能面は、表面形状シミュレーションを使用して構造化エンドミルを用いたミリングで高い加工速度で製造することができる。

5-4-2 切削試験の結果

切削試験結果により、回転軸の傾斜は仕上げ加工面の粗さを改善する。表面プロファイルモデルを検証するために、ポリカーボネートに対して Fig.5-11 のように工具回転軸を送り方向に角度 30° で傾け、エンドミルによる切削試験を行った。Fig.5-12 はストラクチャ付多結晶ダイヤモンドエンドミルである。

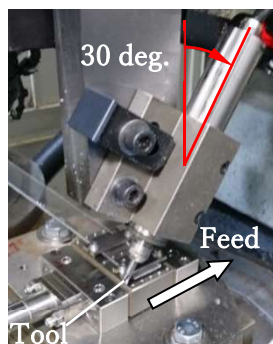


Fig.5-11 Cutting test.

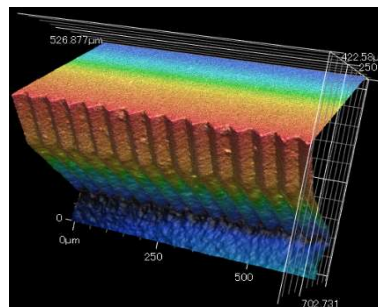


Fig.5-12 Structured tool.

直径は 6mm、ピッチおよび角度は、0.05mm および 90° である。したがって、ニックの大きさは $25\mu\text{m}$ となる。ニックは半径方向および軸方向すくい角がそれぞれ 0° であり、エンドミルの端部に UV (355nm) ピコ秒 (15ps) レーザ加工で成形された。ポリカーボネート板の側面を、回転軸を 30° の角度で傾斜させて、0.2mm の半径方向の切込み深さで片側面を切削加工した。Fig.5-12 のように、切削方向はアップカットである。表面プロファイルおよび表面粗さは、レーザ顕微鏡 (キーエンス製レーザ顕微鏡:VK-X1000) を用いて測定した。

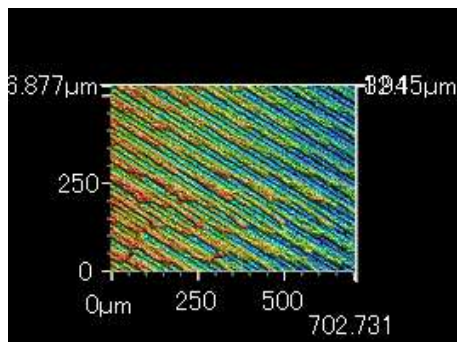
切削条件を Table5-13 に示す。最大表面粗さの変化を送り速度と比較するために、ここでは 2 つのスピンドル速度で表面を仕上げた。

Table5-13 Cutting parameters.

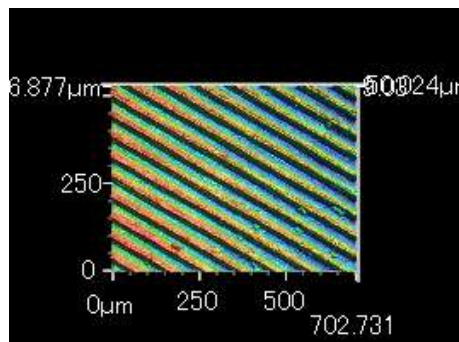
Workpiece	Polycarbonate
Spindle speed	10,000 rpm, 18,000 rpm
Cutting speed	188 m/min, 339 m/min
Feed rate	500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000 mm/min
Cutting manner	Up cut
Lubrication	Dry

5-4-3 仕上げ面プロファイルの比較結果

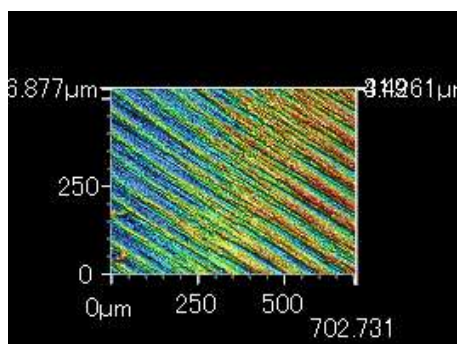
シミュレーションと切削試験による仕上げ加工面の粗さを比較した。Fig.5-14 は切削条件による仕上げ加工面を比較したものである。



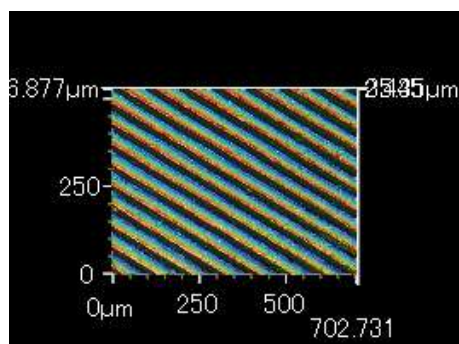
(a) 10,000 rpm
1,250 mm/min



(b) 10,000 rpm
2,000 mm/min



(c) 18,000 rpm
1,500 mm/min

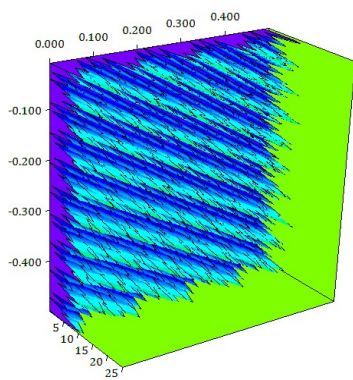


(d) 18,000 rpm
1,750 mm/min

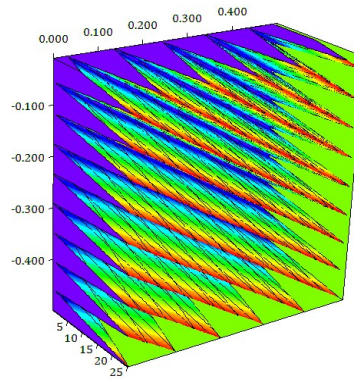
Fig.5-14 Surface finishes.

(a)および(b)は、回転数 10,000rpm における送り速度 1,250 および 2,000 mm/min における仕上げ面である。Fig.5-13(c)および (d)は、回転数 20,000rpm における送り速度 1,250 および 2,000 mm/min における仕上げ面である。

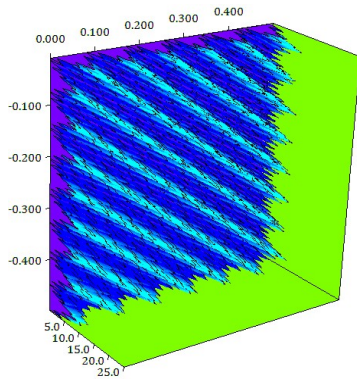
切削条件によって仕上がり面に大きな違いが確認出来る。Fig.5-15 は 0.5 mm 四方の仕上げ面プロファイルのシミュレーションである。切削条件は Table5-13 と同様である。



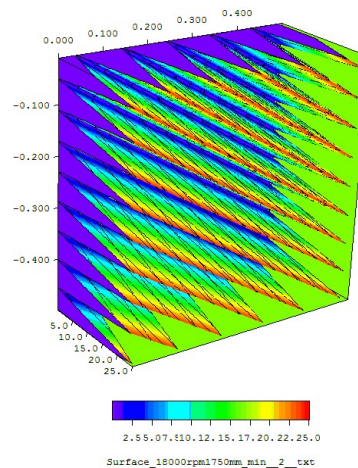
(a) 10,000 rpm
1,250 mm/min



(b) 10,000 rpm
2,000 mm/min



(c) 18,000 rpm
1,500 mm/min



(d) 18,000 rpm
1,750 mm/min

Fig.5-15 Simulations of Surface finishes.

工具回転軸を傾斜させて送る場合、微小仕上げ面領域に対して、それぞれのニックが除去する領域がお互いに重なる。この重複の領域は主軸回転数と送りによって変化するため、同図のように仕上げ面が大きく変化する。送りが2,000mm/minの場合、重複領域がほとんどないため、最大高さ粗さは、ニックの大きさに相当する25 μ m程度となる。一方、1,250mm/minでは除去領域の重複が多く、最大高さあらさは7 μ m以下となっている。

Fig.5-16は、板厚方向に対して仕上げ面プロファイルの実測とシミュレーションを比較したものである。両者は、ほぼ一致しており、解析モデルの妥当性を確認できる。

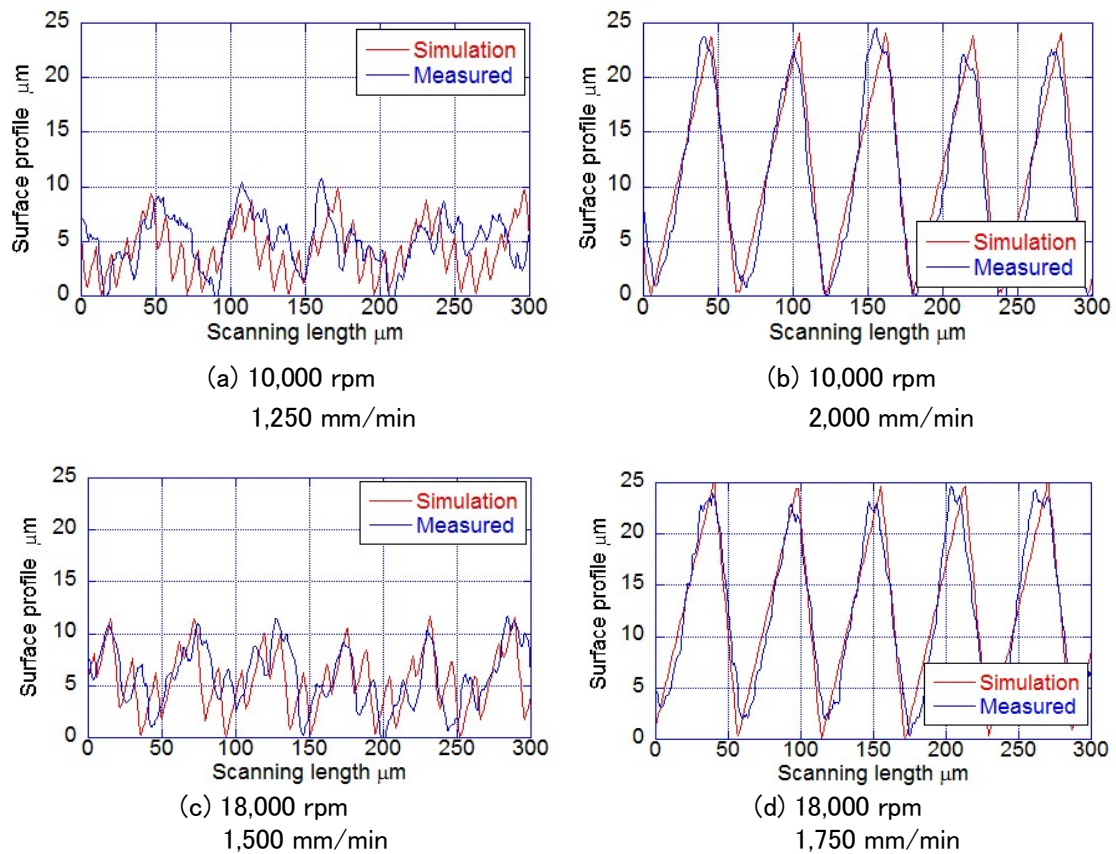


Fig.5-16 Surface profiles.

5-5 最大高さ粗さマップによる検討

以上の結果から最大高さ粗さマップによる検討を行った。Fig.5-17は、主軸回転数と送りに対して、最大高さ粗さを解析したものである。同図より工具回転軸を傾斜させるとニックの除去領域が重複するが、これが回転数と送り速度に依存するため、仕上げ面粗さが変化することがわかる。

ストラクチャを付与した刃先を使用したフライス加工で仕上げられる表面形状は、主軸回転数とテーブル送り速度に依存する。最大表面粗さは 30° の工具回転軸傾斜角でこれらの切削パラメータに対して計算される。Fig.5-16は、主軸回転数及び送り速度をそれぞれ $[10,000 \sim 20,000]$ rpm 及び $[500 \sim 2,000]$ mm/min で変えたときの最大表面粗さのマップを示す。最大高さ粗さは、主軸回転数と送り速度の組み合わせによって変化する。

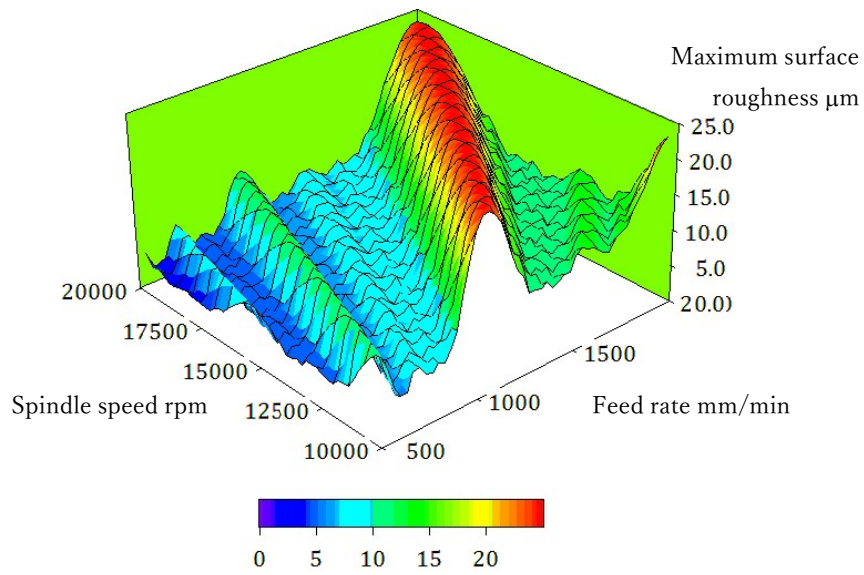


Fig.5-17 Maximum surface roughnesses for cutting parameters.

Fig.5-18 は、10,000 および 18,000rpm のスピンドル速度における送り速度による最大表面粗さの変化を示す。

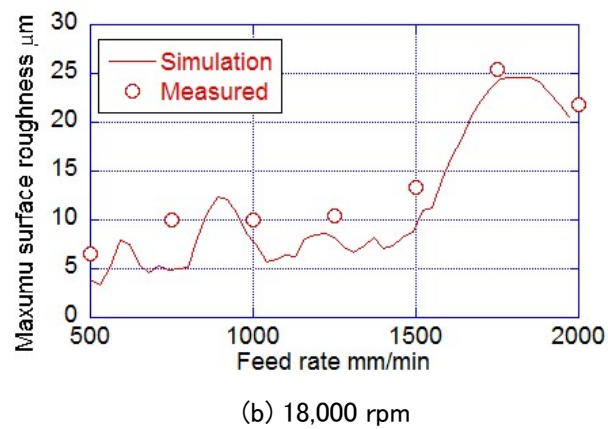
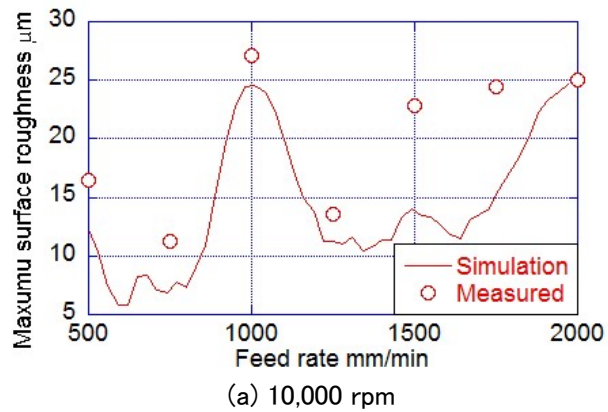


Fig.5-18 Maximum surface roughnesses for feed rate.

ここで記号は、表面プロファイルの 10 回の走査で測定された平均最大表面粗さである。18,000rpm での結果において、シミュレーションは測定された表面粗さとよく一致する。シミュレートした表面粗さは、10,000 rpm のスピンドル速度でほぼ一致する。しかしながら、500, 1,500 および 1,750mm/min の送り速度ではシミュレーションのいくつかの不一致が現れる。表面仕上げは切削パラメータおよび工具形状によって制御される幾何学的形状だけでなく、切りくず形成、不十分な切削による材料の弾性変形・回復、プロセス振動および接着にも依存する。Fig.5-19 は、三次元図で表面を示す。

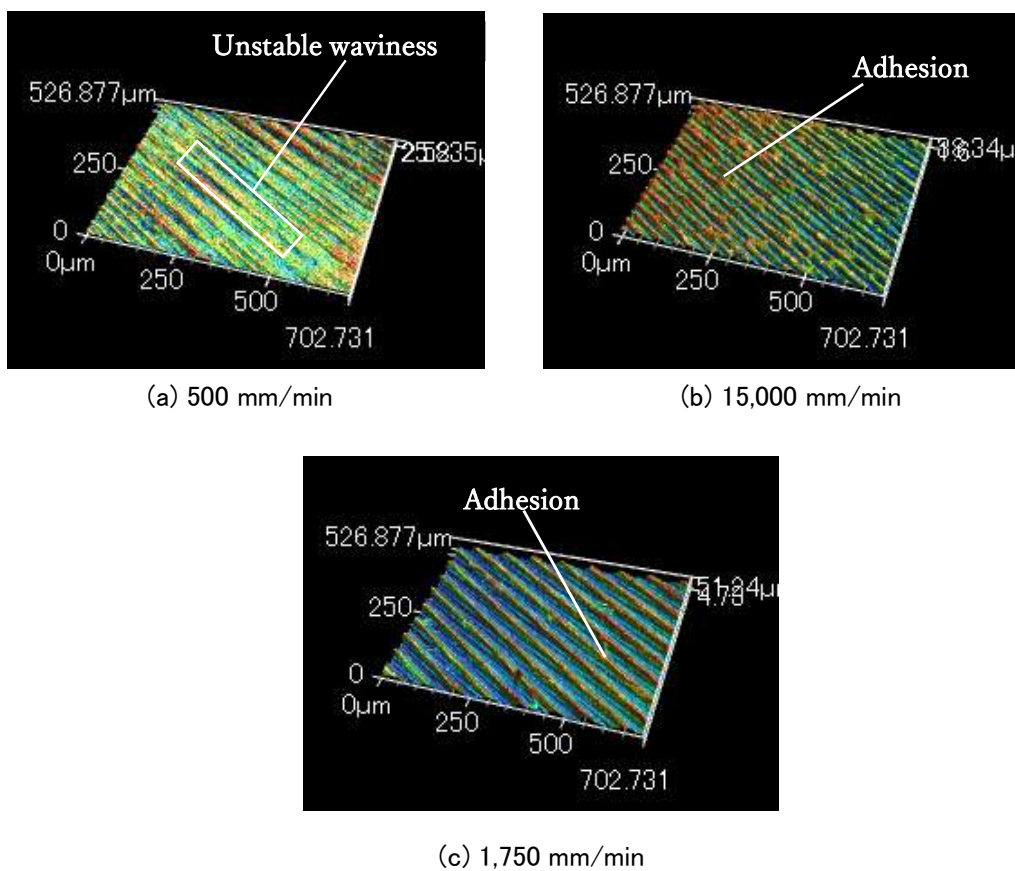


Fig.5-19 Adhesions on the surfaces.

500mm/min の送り速度では、未切断チップ厚さに対する比較的大きいエッジ半径のために不十分な切断が生じる。その結果、表面に不安定な波打ちが見られる。一方、1,500 および 1,750mm/min で仕上げられた表面にはいくらかの接着が残っている。シミュレーションからの矛盾は、除去された材料の付着によって引き起こされる。

5-6 考察

微細なニックを有するエンドミルの片側側面切削に対して、仕上がり加工面プロファイルの解析モデルを提案し、その妥当性を明らかにした。その結果、工具回転軸を傾斜させるとそれぞれのニックの除去領域がお互いに重複するため、仕上がり加工面プロファイルが変化する。最大高さ粗さは、工具回転軸の傾斜角、回転数、送りに依存することを明らかにした[24] [25]。

提示したモデルは、レーザ加工により成形された PCD エンドミルを用いたポリカーボネートのフライス加工における切削試験により検証した。実測とシミュレーションを比較した結果、両社はほぼ一致しており、解析モデルの妥当性を確認した。これより、工具回転軸が傾斜している場合、表面粗さは主軸回転数と送り速度で制御が可能である。

工具回転数を送り速度による表面粗さの変化を表した最大高さ粗さマップは、シミュレーションの表面粗さは測定したものとほぼ一致したが、いくつかの低い切断速度では不一致が現れた。これは、切りくずの噛み込みや溶着のために不十分な切削が行われたために現れたと考えられる。

5-7 まとめ

本章では、レーザ加工によりストラクチャを付与した PCD 工具の実現と最適な切削条件の選定により、加工面粗さを制御する技術を確立した。

レーザ加工によるピッチ $50\mu\text{m}$ 、刃先丸み $1\mu\text{m}$ のストラクチャ付 PCD 工具の実現と、傾斜した工具の回転軸に対する表面形状シミュレーションにより、任意の加工面粗さを実現するための切削条件の選定をおこなった。その結果、数 μm から数十 μm の加工面粗さを、切削条件を変えるだけで実現する技術を確立した。

本章の技術は今後、大きな波及効果を期待できる。切削で発生する切り粉は、切り屑とも呼ばれ、通常は文字通り屑として廃棄されるものである。しかし、切り粉の大きさを制御する技術に応用することで、任意の大きさの切り粉の作成が可能となり、屑が製品になるという逆転の発想が生まれる。金属パウダーの効率的に生産する技術への展開が期待される。

第 5 章の参考文献

- [1] N. Kawasegi, H. Sugimori, H. Morimoto, N. Morita, and I. Hori, Development of Cutting Tools with Microscale and Nanoscale Textures to Improve Frictional Behavior, *Precision Engineering*, Vol. 33, pp. 248-254, 2009.
- [2] D. Jianxin, W. Ze, L. Yunsong, Q. Ting, and C Jie, Performance of Carbide Tools with Textured Rake-face Filled with Solid Lubricants in Dry Cutting Processes, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, Vol. 30, Issue 1, pp. 164-172, 2012.
- [3] T. Sugihara, and T. Enomoto, Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface - Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns, *Precision Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 425-429, 2009.
- [4] T. Enomoto, and T. Sugihara, Improving anti-adhesive properties of cutting tool surfaces by nano-/micro-textures, *Annals of the CIRP*, Vol. 59, pp. 597-600, 2010.
- [5] T. Sugihara, and T. Enomoto, Improving anti-adhesion in aluminum alloy cutting by micro stripe texture, *Precision Engineering*, Vol. 36, No. 2, pp. 229-237, 2012.
- [6] T. Enomoto, T. Sugihara, S. Yukinaga, K. Hirose, and U. Satake, Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting, *Annals of the CIRP*, Vol. 61, pp. 571-574, 2012.
- [7] T. Sugihara, and T. Enomoto, Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces, *Precision Engineering*, Vol. 37, No. 4, pp. 888-896, 2013.
- [8] Z. Fang, and T. Obikawa, Cooling Performance of Micro-texture at The Tool Flank Face under High Pressure Jet Coolant Assistance, *Precision Engineering*, Vol. 49, pp. 41-51, 2017.
- [9] T. Matsumura, and Usui, E., Predictive Cutting Force Model in Complex-shaped End Milling Based on Minimum Cutting Energy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 50, No. 5, pp.458-466, 2010.
- [10] E. Uhlmann, F. Sammler, S. Richarz, F. Heitmüller, and M. Bilz, Machining of Carbon Fibre Reinforced Plastics, *Procedia CIRP* Vol. 24, pp. 19-24, 2014.
- [11] <https://www.kennametal.com/en/industry-solutions/aerospace/machining-cfrp-composites.html>.
- [12] P.G. Benardos, G. C. Vosniakos, Predicting Surface Roughness in Machining: A Review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, Issue 8, pp. 833-844, 2003.
- [13] S.J. Zhang, S. To, S.J. Wang, and Z.W. Zhu, A Review of Surface Roughness Generation in Ultra-precision Machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 91, pp. 76-95, 2015.
- [14] J. P. Costes, A Predictive Surface Profile Model for Turning Based on Spectral Analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, Issue 1, pp. 94-100, 2013.
- [15] C. Felhő, B. Karpuschewski, and J Kundrák, Surface Roughness Modelling in Face Milling, *Procedia CIRP*, Vol. 31, pp. 136-141, 2015.

- [16] A. A. G. Bruzzone, H. L. Costa, P. M. Lonardo, and D. A. Lucca, *Advances in Engineered Surfaces for Functional Performance*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 57, pp. 750-769, 2008.
- [17] M. Yoshino, T. Matsumura, N. Umehara, Y. Akagami, S. Aravindan, T. Ohno, *Engineering surface and development of a new DNA micro array chip*, *Wear*, Vol. 260, pp. 274-286, 2006.
- [18] D. P. Wan, B. K. Chen, Y. M. Shao, S. L. Wang, and D. J. Hu, *Microstructure and Mechanical Characteristics of Laser Coating-texturing Alloying Dimples*, *Applied Surface Science*, Vol. 255, pp. 3251-3256, 2008.
- [19] X. Luo, Y. Wang, P. Chen, and L. Zhou, *Investigation of CO2 Laser Beam Modulation by Rotating Polygon*, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, pp. 132-136, 2011.
- [20] Y. Q. Wang, G. F. Wu, Q. G. Han, L. Fang, and S. R. Ge, *Tribological Properties of Surface Dimple-textured by Pellet-pressing*, *Procedia Earth and Planetary Science* 1, pp. 1513-1518, 2009.
- [21] S. Kogusu, T. Ishimatsu, Y. Ougiya, *Rapid Generation of Surface Dimples Using End Milling*. *International Journal of Automation Technology*, Vol. 1, pp. 45-51, 2007.
- [22] T. Matsumura, S. Takahashi, N. Nagase, and Y. Musha, *Micro dimple milling for structured surface*, *Advanced Materials Research* Vols. 966-967, pp. 142-151, 2014.
- [23] T. Matsumura, and S. Takahashi, *Micro Dimple Milling on Cylinder Surfaces*, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, pp. 135-140, 2012.
- [24] 内山文宏, 坪井昭彦, 松村隆, *微細ストラクチャエンドミルの傾斜回転における仕上げ面プロファイル*, *日本機械学会 第 12 回生産加工・工作機械部門講演会論文集*, p. A10, 2018.
- [25] F. Uchiyama, A. Tsuboi, T. Matsumura, *Surface Profile Analysis in Milling of Structured Tool*, *International Journal of Automation Technology*, Vol.13, No.1, pp. 101-108, 2019.

第6章 小規模企業が新規事業を起こすための考察

第6章は小規模企業が新規事業を起こすことにより、下請け企業から研究開発型企业へ成長するための方向性について述べる。6年間にわたる事業実践内容（研究内容は第2章～第6章）を経験的・説明的に記述する。小規模工具メーカーが、新に工具開発事業を起こした事例を対象として、新規事業を起こすためには、何が必要で何が重要かについて検討する。そして、それらの検討を通じて小規模企業が下請け企業から研究開発型企业へ成長するための方向性を示す。背景、目的、小規模企業による新規事業実践、考察について記す。

6-1 背景 -中小企業白書・科学技術基本計画-

中小企業は国の経済にとって重要な役割を占めている。中小企業は、Table6-1 のように中小企業基本法によって資本金と従業員数によって定義されている [1]。そのうち製造業の小規模企業とは従業員が20人以下と定義されている。本論文の中で、小規模企業とは、中小企業基本法上の中小企業の定義における「小規模事業者」をいう。

Table6-1 中小企業基本法の定義
引用 2019年版 中小企業白書

業種	中小企業		うち 小規模事業者
	資本金	または 従業員	従業員
製造業 その他	3億円以下	300人以下	20人以下
卸売業	1億円以下	100人以下	5人以下
サービス業	5,000万円以下	100人以下	5人以下
小売業	5,000万円以下	50人以下	5人以下

小規模企業は、Table6-2 のように我が国の企業数 382 万者のうち 325.2 万者（全体の約 85%）、従業員数 4,794 万人のうち 1,127 万人（約 23.5%）であり我が国経済の大きな割合を占めている [2]。

Table6-2 中小企業基本法の企業数, 従業者数
引用 2017年版 中小企業白書

	企業数	従業者数
大企業	1.1万者	1,433万人
中小企業	380.9万者	3,361万人
うち小規模事業者	325.2万者	1,127万人

中小企業は自ら需要を獲得する必要に迫られている。従来、大企業と中小企業・小規模事業者との間に存在した相互依存関係の下、受託加工を事業としてきた中小企業・小規模事業者は、大企業が市場から獲得してきた需要の恩恵を享受してきた。しかし、グローバル化の進展等を背景に、大企業と中小企業・小規模事業者との間の相互依存関係は希薄化し、これにより、中小企業・小規模事業者は自ら市場と向き合い、需要を獲得する必要に迫られている。また、中小企業が高度化を図ることが我が国製造業の国際競争力向上に資すると 2015 年版中小企業白書は指摘している [3]。

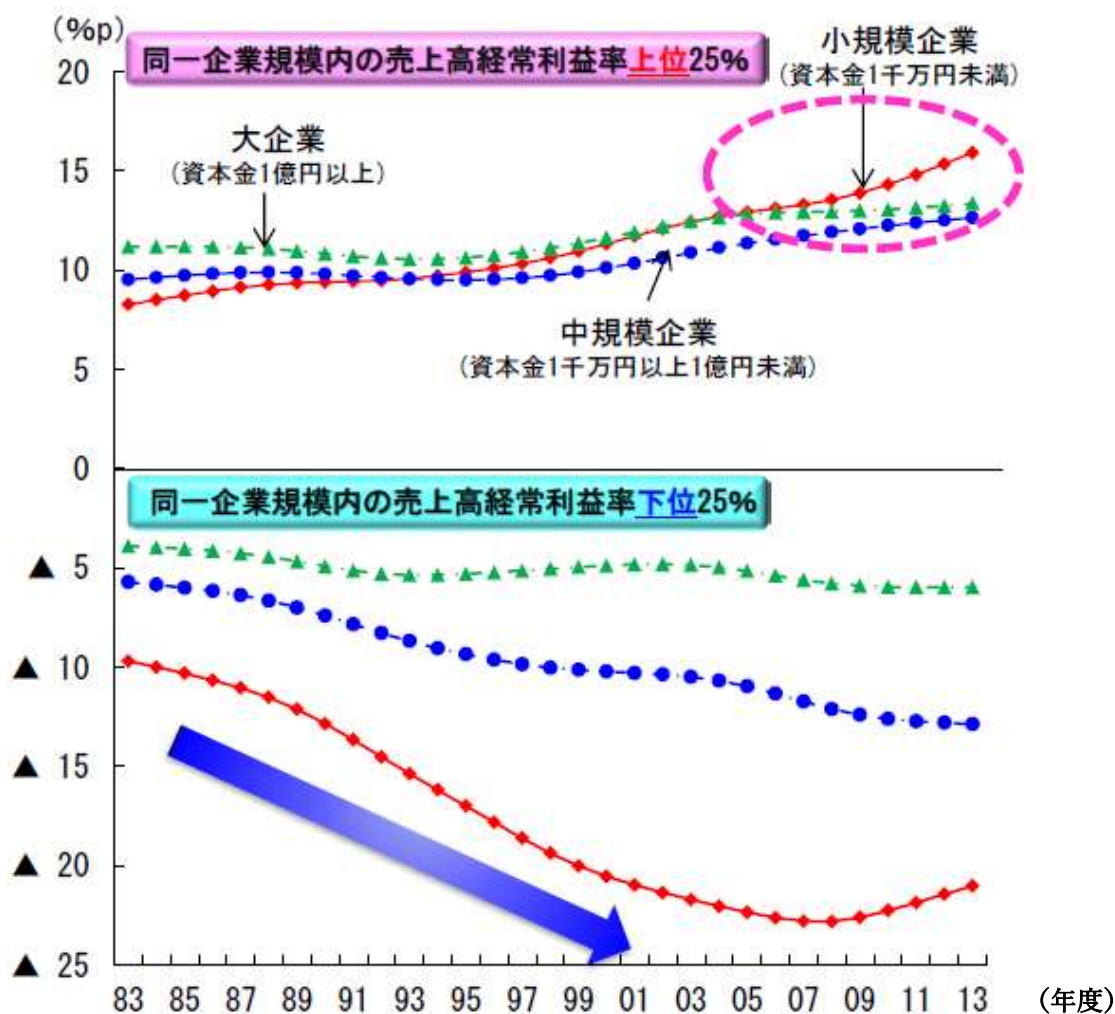
中小企業における新規事業に繋がるイノベーションの創出は国の施策と合致している。平成 28 年 1 月 22 日に閣議決定された科学技術基本計画において、目指すべき国の姿の実現に向けた科学技術イノベーションの推進に当たり、第 5 期基本計画の政策の柱として以下の 4 つの取組みをあげている。

- i) 未来の産業創造と社会変革に向けた新たな価値創出の取組み
- ii) 経済・社会的課題への対応
- iii) 科学イノベーションの基盤的な力の強化
- iv) イノベーション創出に向けた人材・知・資金の好循環システムの構築

その基本計画の中で、イノベーション創出に向けた人材・知・資金の好循環システムの構築では、新規事業に挑戦する中小・ベンチャー企業の創出強化の必要性があげられている。また、技術シーズを短期間で新規事業につなげるようなイノベーションの創出は、市場規模の制約があり意思決定に時間を要する大企業よりも、迅速かつ小回りの利く中小・ベンチャー企業との親和性が高いと中小企業の重要性が述べられている [4]。

小規模企業には高収益を上げる企業が存在する。2015 年版中小企業白書によれば、同じ規模の企業間の収益力の差は拡大しているが、小規模企業では、低収益企業の収益が低下する一方で、高収益の小規模企業の収益率は、大企業を凌いでいる (Fig.6-3)。同白書では、高収益企業は低収益企業と比べ、「優秀な人材の確保、人材育成」、「技術開発の拡大」を強

く意識していると指摘している [3].



(同一規模内の売上高経常利益率が上位 25%の企業を高収益企業, 下位 25%の企業を低収益企業と定義)

Fig.6-3 高収益企業と低収益企業の売上高形状利益率(製造業)
引用 2015年版 中小企業白書

6-2 目的

小規模企業が新規事業の起こすための方向性が見えないことが問題である。中小企業が生き残るためには、自ら需要を獲得し、新規事業に繋がるイノベーションを創出することが重要であるが、ヒト・カネ・モノといった経営リソースに乏しい小規模企業が新規事業を起こすことは、現実的には大変な困難を伴う [5]。小規模企業にとって、産学連携を構築したくても、大学の敷居は高く感じるため、大学の門戸を叩く一歩が踏み出せない。開発資金を調達したくても、生産力アップに直接的には貢献しない開発用途では銀行からの借入は難

しいうえ、補助金は申請したくても要領がわからない。知名度のない小規模企業では優秀な人材の確保も難しい。営業活動のノウハウを持たない小規模企業にとって、川下企業（最終製品を組み立てる企業の意味）のニーズを集めるにも方法がわからなければ、自社の強みもはっきりしないなど、課題が山積している。そのため、小規模企業が新規事業を起こすには、何からどう進めればよいのかわからないという現実がある。

学にとって、産である中小企業との連携では研究資金の調達や成果の認識に課題がある。学にとって中小企業との産学連携では、潤沢な研究資金は期待できない。また、産学連携経験の少ない中小企業では、事業化を急ぐあまり、学へ短期的な成果を求めすぎる傾向にある。学と産において成果に対する時間的なずれが問題である。

そこで我々が取組んできた6年間の事業実践（研究内容は第2章から第5章）を通じ、小規模企業が新規事業を起こすには何が必要で、何が重要であったかを観察することで、小規模企業が新規事業を起こす際に、ヒントになる方向性を示すことを目的としている。

6-3 小規模企業による新規事業実践

小規模企業の新規事業を起こし、成功するための要因を検討する。我々が進めてきた新規事業を事例 [6] [7] として、何が起こったかをまとめる。今後、新たな事業を円滑に進めるための成功要因を検討する [8]。

6-3-1 産学連携構築の内容

小規模工具メーカーである株式会社内山刃物（以下、U社と記す）が、レーザを用いた工具開発を新規事業として立ち上げた事例である。既存顧客への売上に限界を感じたU社は、自社の生き残りをかけて、工具を自社開発するという新規事業を起こす決意した。

U社は最初に連携体制を構築した。小規模企業であるU社は、工具の開発経験に乏しく、経営リソースにも課題がある。そこでまずU社が行った行動は、学会への参加である。切削関係の学会に参加して情報収集した結果、U社が必要とする分野の専門家である東京電機大学（以下、T大学と記す）のM教授と巡り合った。産学連携の経験豊富なM教授との協議から、工具開発事業を立ち上げるためには、産学連携体制の構築と開発資金の調達が重要であることがわかった。U社はレーザ加工技術の経験も知識もないため、レーザ加工技術を確保するために、U社の代表者自らが光産業創成大学院大学（以下、G大学と記す）へ社会人入学した。さらに、実験の指導、評価のサポートとして静岡県工業技術研究所浜松工業技術支援センター（以下、H工技センターと記す）とも連携した。そうしてでき上がった連携体制が Fig.6-4 である。



Fig.6-4 産学官連携の事例における共同研究体制

次に、開発資金を調達した。調達には使い勝手の良い補助金を選択した。レーザー装置は高額なため、その金額を賄える補助金を申請する必要がある。小規模企業が申請できる最大規模の補助金である戦略的基盤技術高度化支援事業（通称：サポイン事業）[9]を選択した。サポイン事業は、小規模企業であるU社にとって、求められる技術レベルが高いうえ、倍率も高く、採択までには3年を要した。しかし、その間に得られた知見は、経験しないと得られない貴重なものであった。

サポイン採択によりレーザー装置を導入した。U社はG大学の技術的支援とH工技センターによるレーザー基礎実験結果をもとに、サポイン事業の資金を用いてレーザー工具成形装置を開発、導入した。レーザー装置の導入により、経営リソースの調達が完了した。

レーザー装置の導入により、レーザー加工技術を確立した。U社はG大学と共同でレーザー工具成形機を用いてレーザー照射条件の最適化を行い、レーザーによる工具成形技術を確立した。

レーザー加工技術を応用して工具開発を行った。U社は開発したレーザーによる工具成形技術を用いて、T大学からの技術的支援とH工技センターからの工具評価技術支援により工具開発を行った。

開発した工具により事業化を達成した。T大学とG大学はU社と共同で学会での発表や、論文を投稿した。G大学はH工技センター主催の成果発表会にて発表した。U社は展示会出展、専門誌への執筆等の広報活動を行った。その結果、新聞や専門誌での記事、表彰等に繋がった。さらに、材料、機械、輸送機器、光学部品メーカー等との共同開発が始まり、次の補助金のテーマにも繋がった。

産学官連携は6年間継続している。産学官連携を進めてきた経緯の中で、最終目標を事業化とした場合、次の6つのSTEPに分けて考えることができる。STEP1は連携体制の構築、STEP2は補助金による開発資金の調達、STEP3はレーザー工具成形装置の開発・導入、STEP4はレーザーによる工具成形技術の開発、STEP5は工具開発、STEP6は事業化であり、6つのSTEPとその内容についてまとめたものをTable6-5に示す。

Table6-5 6つのSTEP

	STEP	内 容
1	連携体制の構築	工具開発はU社(産), レーザ技術はG大学(学), 切削技術はT大学(学), レーザ照射試験と切削評価はH工技センター(官)の4者による産学官連携の体制を構築した。
2	補助金による開発資金の調達	U社はレーザ装置や切削試験環境を整備するための開発資金調達に補助金(サポイン事業)を活用した。サポイン事業では事業管理団体として浜松地域イノベーション推進機構と連携した。
3	レーザ工具成形装置の開発・導入	U社はG大学の技術的支援とH工技センターによるレーザ基礎実験結果をもとに, サポイン事業の資金を用いてレーザ工具成形装置を開発, 導入した。
4	レーザによる工具成形技術の開発	U社はG大学と共同でレーザ工具成形機を用いたレーザ照射条件の最適化を行い, レーザによる工具成形技術を開発した。
5	工具開発	U社は開発したレーザによる工具成形技術を用いて, T大学からの技術的支援とH工技センターからの工具評価技術支援により工具開発を行った。
6	事業化	<ul style="list-style-type: none"> ・T大学とG大学はU社と共同で学会発表, 論文投稿した。 ・G大学はH工技センター主催の成果発表会にて発表した。 ・U社は展示会出展, 専門誌への執筆等の広報活動を行った。 その結果, 新聞や専門誌での記事, 表彰等に繋がった。さらに, 材料, 機械, 輸送機器, 光学部品メーカー等との共同開発が始まり, 次の補助金のテーマにも繋がった

6-3-2 事業実践の一覧

6つのSTEPにおいて, 実践した項目が, 事業化を推進させる成果に繋がったかどうかを4つの要素に分けてまとめたものをTable6-6に示す。4つの要素は学会発表, 展示会, 資金, 論文・記事とした。表中の数字は, 学会発表は①～⑧, 成果発表は⑨, 専門委員会や研究会等での招待講演は⑩～⑳, 展示会出展は㉒～㉖, 補助金申請は㉗～㉓, 論文は㉔～㉘, 記事は㉙～㉕である。表中の○は次に繋がったもの(成果あり), ×は次に繋がらなかったもの(成果なし)である。個々の成果の詳細については6-3-3 事業実践における成果の詳細に記す。

Table6-6 成果のまとめ

	STEP	学会発表・講演	展示会	資金	論文・記事
1	連携体制の構築	○①産学連携 ○⑧産学連携 ×⑩浜南高 OB		○⑳県-産学官（不採択） ○㉑サポイン（不採択） ○㉒サポイン（採択） ×㉓市-事業化（採択） ×㉔もの補助（採択） ×㉕市-光電子（採択） ○㉖サポイン（不採択） ○㉗サポイン（採択）	○㉘レーザ加 ×㉙型技術 ○㉚日経トッ ○㉛日経ビジ
2	補助金による開発資金の調達	○⑮補助金獲得		×㉜県-産学官（不採択） ○㉝サポイン（不採択） ○㉞サポイン（採択） ○㉟市-事業化（採択） ○㊱もの補助（採択） ○㊲市-光電子（採択） ○㊳サポイン（不採択） ○㊴サポイン（採択）	
3	レーザ工具成形装置の開発・導入			○㉚サポイン（採択） ○㉕市-光電子（採択）	
4	レーザによる工具成形技術の開発	○⑤レーザー ○⑯中部レーザ ○㉑中部レーザ		○㉚サポイン（採択） ○㉕市-光電子（採択）	○㉘レーザ加 ○㉙レーザ加 ×㉚生産財マ- ×㉛元気な企
5	工具開発	○②砥粒加工 ○③IMEC ×④砥粒加工 ○⑥日本機械 ○⑦IMEC ○⑨浜工技 ○⑪切削加工	×㉜三遠南信 ○㉝MECT ×㉞ヨコハマ ○㉟関西機械 ○㊱MECT	×㉜県-産学官（不採択） ○㉝サポイン（不採択） ○㉞サポイン（採択） ×㉟市-事業化（採択） ○㊱もの補助（採択） ○㊲市-光電子（採択） ○㊳サポイン（不採択）	○㉘IJAT ○㉙レーザ加 ○㉚機械技術 ○㉛機械と工 ×㉜生産財マ ○㉝日経新聞 ○㉞日経産業

		×⑫いわしん ○⑬精密加工 ×⑭切削加工 ×⑰難削材加工 ○⑱精密加工 ×⑲切削加工 ×⑳生産加工		○⑳サポイン（採択）	×④中日新聞 ○⑦日経ビジ ○⑧精密工学 ×⑨日刊工業 ×⑩元気な企
6	事業化		×⑳三遠南信 ○㉑MECT ×㉒ヨコハマ ○㉓関西機械 ○㉔MECT	×㉕県-産学官（不採択） ○㉖サポイン（不採択） ○㉗サポイン（採択） ○㉘市-事業化（採択） ○㉙もの補助（採択） ○㉚市-光電子（採択） ○㉛サポイン（不採択） ○㉜サポイン（採択）	○㉝レーザ加

STEP1の「連携体制の構築」では、「学会発表・講演」、「資金」、「論文・記事」において、成果に差が生じた。「学会発表・講演」では、内容に技術的新規性や話題性はもちろんのこと、聴講者の専門分野、人数等によっても差が生じたと考えられる。産学連携学会の口頭発表では、自身の研究内容と近い研究者を発見でき、さらには意見交換できることが次に繋がる成果である。「資金」における成果の差は、補助金の申請時に連携を必要とするか、そうでないかで差が生じた。サポインでは申請時に産学連携体制の構築が必須であり、申請書の作成段階において、意見交換を重ねることで川下企業（最終製品を組み立てる企業の意味）や学、官との連携が強まる効果があった。また、同時に、市場ニーズや開発課題、開発方法等が明確になる効果もあった。さらには、補助事業としてのゴール（目標値）を共通認識することで、共同研究体としての連携意識を高める効果があった。つまり、連携体制を必要とするサポインのような補助金の申請では、不採択の場合でも連携を強化する効果があった。「論文・記事」においては、産学連携を題材にしり、特集した出版物において成果が認められた。読者の関心にマッチしているかどうか重要である。

STEP2の「補助金による開発資金の調達」における直接的な成果は、採択による資金の調達である。しかし、サポイン事業においては不採択であっても、次に繋がる成果が3点あった。1つ目は、産学連携体制の構築である。サポイン事業は申請時に産学連携での出願が必須となっており、共同申請を持ちかけることで、産から学へ連携を依頼しやすいというメリットがある。2つ目は、マーケットインが可能となることである。サポイン事業では申請前に川下企業へのヒアリングが必須であり、市場性、将来性、ニーズ、技術課題等の調査に

より、具体的な開発目標値を川下企業と共同で設定し、申請書に明記する必要がある。申請により、開発を進めるにあたり重要な情報を取得できるメリットがある。サポイン事業以外に実践した補助金では、開発目標値を川下企業と共同で設定する必要はないため、開発情報の取得はサポイン申請に特徴的な成果と言える。3つ目は、ビジョンの明確化である。一般的な補助金申請では事業化計画の作成が含まれるが、サポイン事業では、より具体的で実現可能な計画が求められる。そのため、販売促進戦略、知財戦略、事業化への実現性、事業化による経済効果、追加研究・設備投資・人員計画等の事業化に至るまでのスケジュール等を具体的に作成する必要がある。会社のビジョンを明確化できるメリットがある。しかも、事業管理団体等の申請をサポートする機関の指導が得られ、申請書のブラッシュアップを繰返し行うことで、実現性の高い事業化計画を作成することが可能となる。

STEP 3の「レーザ工具成形装置の開発・導入」では、補助金を原資として、装置開発を行った。技術開発ができる環境の整備に繋がる成果があった。

STEP4の「レーザによる工具成形技術の開発」では、「学会発表・講演」、「資金」、「論文・記事」において成果があった。「学会発表・講演」ではレーザ技術における自社の強みを明らかにする効果があった。「論文・記事」ではレーザ関係の学会、出版物の方が、波及効果が大きかった。つまり、技術分野にマッチした学会や研究会を選択することが重要である。第2章はSTEP3とSTEP4の開発内容である。

STEP5の「工具開発」では、「学会発表・講演」、「展示会」、「資金」、「論文・記事」の全てにおいて成果があった。「学会発表・講演」では、学会よりも専門委員会や研究会における成果が大きかった。専門委員会や研究会での講演では、学会発表に比べて講演時間が長く、十分な説明を行えることと、講演後に聴講者との意見交換をしやすいことが成果に繋がったと考えられる。講演後、業界専門誌の記者からの記事執筆依頼や、他の専門委員会への講演依頼を受け、つぎの成果に繋がった。成果が上がらなかった要因としては、分野のミスマッチが主な原因と考えられる。聴講者や読者の分野が異なれば、感心が薄く、効果が見込めないためである。「展示会」では、展示会の分野と出展内容とのマッチングで成果に差が生じたと考えられる。出展内容とマッチした展示会选择することが重要である。「資金」では、補助金の採択により工具開発が円滑に進んだ。しかし、サポイン事業においては不採択でも、工具開発において成果があった。申請段階において開発目標が明らかになることで、開発の方向性が定まり、自己資金の範囲内での開発がスタートできるためである。小規模製造業者において「自社の強みを、どこにどう生かせばよいか？」は、経営上の大きな課題であり、サポイン申請による開発の方向性の設定は、一つの解になると考えられる。「論文・記事」では、「展示会」と同様に、分野とのマッチングで成果に差が生じた。論文や記事の掲載先の分野とマッチした学会誌、業界誌を選択することが重要である。さらには、論文や

記事は、明文化されているため、継続的な宣伝効果と、技術的信用度の向上が見込まれる。小規模製造業者が開発力を証明するためのツールとしての役割を果たすと考えられる。第3章、第4章、第5章はSTEP5の開発内容である。

STEP6の「事業化」では、「展示会」、「資金」において成果があった。「展示会」では、どの展示会においても一定の成果は認められたが、展示会の分野によって成果に差が生じた。「展示会」は川下企業へ直接PRできるメリットがあるが、実は、その場で新規の顧客となる例は少ない。工具販売や工具開発の場合、技術的信用度の有無が取引開始のカギとなるためである。「資金」においては、補助金申請時に作成した事業化計画の完成度によって成果に差が生じている。STEP1, 2, 5と同様に、「事業化」においても、サポイン事業の効果が高い。サポイン事業の申請では、実現可能性の高い事業化計画の作成が求められ、小規模製造業者の経営者や後継者が自ら作成することが重要である。

成果が別の成果に繋がる事例は、ほかにもいくつか見受けられた。1つは、学会発表や論文集、専門誌への執筆は、新たな人材の獲得に繋がった。小規模製造業者が研究開発型企业へ成長するためには、技術力のある人材の確保は必須である。しかし、小規模製造業者において、知名度や安定性の欠如から、工学系大学出身者の採用は困難である。学会発表や論文集、専門誌への執筆等により、会社の知名度や技術レベルが向上することで、工学系大学出身者の採用に繋がった。もう1つは、サポイン事業の採択実績は、研究開発の実績となり、研究開発を担える企業として認知されることとなった。川下企業における信用度の向上に繋がった。

6-3-3 事業実践における成果の詳細

新規事業開拓における成果の詳細を学会発表、成果発表、招待講演、展示会出展、公的資金、論文、記事の順に記す。例えば、(業績5-1)とは業績目録5.学会発表の[1]を示す。Fig.6-7からFig.6-28は、会場や様子、内容を示す写真等である。

学会発表は全部で8件であった。経営系が2件、技術系が6件であった。学会発表は次に繋がる成果が多かった。

① (業績5-1) 産学連携学会第14回大会



Fig.6-7 産学連携学会第14回大会の様子

小規模企業がサポインをとるためには、経験豊富な地域コーディネータが、サポイン申請の初期段階から小規模企業と協同して産学連携を推進することが重要であると論じた。成果として、浜松地域イノベーション推進機構主催の補助金獲得セミナーの講演依頼に繋がった。

② (業績 5-2) 2016 年度砥粒加工学会学術講演会

成果として、精密工学会切削加工専門委員会の講演依頼に繋がった。

③ (業績 5-3) 第 17 回国際工作機械技術者会議(IMEC2016)



Fig.6-8 第 17 回国際工作機械技術者会議の様子 展示(左) プレゼン(右)

IMEC は、広く世界中から工作機械関連の研究者・技術者、ユーザやディーラの参加を募り技術交流を行うことで、世界の工作機械技術の向上に資することを目的として、学会主催による学術研究成果中心の会議とは趣を異にする産業界主導の国際工作機械技術者会議である。来場者数 14 万人を超える日本工作機械見本市(JIMTOF)内にて開催される。「超短パルスレーザーによる微細成形技術を用いた PCD 小径エンドミルの開発」と題し、ポスター発表と口頭発表を行った結果、技術的な打合せ件数は 23 件あり、期待された通りの集客効果であった。IMEC では生産加工を研究している大学が一堂に発表するため、最新の技術動向や、研究内容を知るうえで大きな成果となった。相互に説明をすることで大学間の連携を深めることにも繋がった。JIMTOF への出展料は最小コマでも 36 万円であるのに対して、IMEC は 1 万円であり、費用対効果の面からも次回の発表を決めた。

④ (業績 5-4) 2017 年度砥粒加工学会学術講演会

質疑応答では大手工具メーカーの研究者等から 3 件の質問があり、関心の高さが伺えた。

⑤ (業績 5-5) レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会

「PCD (多結晶ダイヤモンド) 工具刃先成形のための超短パルスレーザー加工技術の開発」と題し、口頭発表した。超短パルスレーザーを用いて PCD 工具刃先成形を試みた結果、従来技術である放電加工や砥石研削に比べ、鋭利な刃先を実現する可能性を論じた結果、3

件の質問があった。

⑥（業績 5-6） 日本機械学会 第 12 回生産加工・工作機械部門講演会



Fig.6-9 日本機械学会 第 12 回生産加工・工作機械部門講演会の様子

「微細ストラクチャエンドミルの傾斜回転における仕上げ面プロファイル」と題し、口頭発表した結果、4 件の質問があった。

⑦（業績 2-2） 第 18 回国際工作機械技術者会議(IMEC2018)



Fig.6-10 第 18 回国際工作機械技術者会議の様子

IMEC は JIMTOF 内の開催であり、JIMTOF の来場者数 15 万人を超えた。前回の IMEC2016 に続き、2 度目の発表となった。「ストラクチャ付 PCD 工具とその応用」と題し、ポスター発表した。最新の技術動向調査や、業務上の課題解決のためのヒント探しを目的として、全社員による JIMTOF 見学を行い、収穫が得られた。出展の成果が見込まれるため、次回以降の IMEC 参加方法の検討が課題である。

⑧（業績 5-7） 産学連携学会第 17 回大会

小規模企業が産学連携を円滑に進めるためには、学と産のお互いの成果を明確にすること、次の成果に繋がる行動を選択することが重要であると論じた。質疑応答では 3 件の質問があった。発表後の区役所の方（官）からは、「地元の中小企業に元気を与える発表であり、あらためて話が聞きたい」との要望があった。

成果発表は1件であった。

⑨ (業績 6-1) 静岡県工業技術研究所 第9回研究・開発成果発表会



Fig.6-11 第9回研究・開発成果発表会の様子 口頭発表(左), ポスター発表(右)

「軟質樹脂用PCD(多結晶ダイヤモンド)エンドミルの開発:超短パルスレーザによるチップブレイカの効果」と題し、口頭発表とポスター発表を行った。超短パルスレーザを用いてチップブレイカを施したPCDエンドミルを開発し、その効果をハイスピードカメラによる動画を用いて説明した。この動画は、その後の展示会、営業活動に大きな成果を上げた。

招待講演は12件であった。招待講演による成果は、他の事業実践に比べて最も有効であった。

⑩ (業績 7-1) 浜松南高 OB 講話

OB講話とは、浜松南高等学校において、自分を見つめ将来の進路について考える時間で、卒業生が教壇に立ち、仕事や生き方について話す授業である。「今が最高におもしろい」と題し、1年生向けに講演を行った。

⑪ (業績 7-2) 精密工学会 切削加工専門委員会

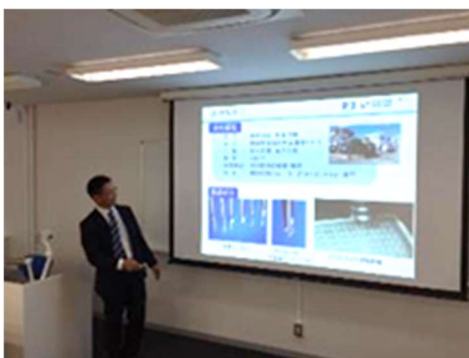


Fig.6-12 精密工学会切削加工専門委員会の様子

切削加工専門委員会は、共同研究者である東京電機大学松村隆教授が委員長を務める、精密工学会内でも老舗の専門委員会である。「ガラスと樹脂の同時切削における課題と工具開発」と題し、講演した。本専門委員会では45分の発表時間があり、研究内容だけでなく、

会社紹介や事業紹介も合わせて行え、十分な説明を行うことが出来た。[13] の講演に繋がった。

⑫ (業績 7-3) 磐田信用金庫第 17 回いわしん中小企業支援セミナー



Fig.6-13 磐田信用金庫第 17 回いわしん中小企業支援セミナーの様子(左)と広告(右)

静岡県では新産業集積クラスタープロジェクトを立ち上げ、西部エリアを「光」と「電子」のフロンティアと位置づけ、産学官相互の技術を融合させた取組を加速させている。近年、既存事業で光技術とは縁のない事業を営んでいた地元中小企業が、産学官の共同研究により光技術を活用することで新規市場を開拓する事例が生まれはじめ、既に一部の先端ものづくり企業だけでなく、食品、建設と広い産業分野で活用されはじめています。そこで、本セミナーでは光技術を分かり易く解説し、その活用事例について情報提供を行うことを目的としている。本セミナーにおいて、「超短パルスレーザーによるダイヤモンド工具成形技術の開発」と題し、講演した。

⑬ (業績 7-4) 砥粒加工学会 第 22 回未来志向形精密加工工具の開発に関する専門委員会
 未来志向形精密加工工具の開発に関する (FT) 専門委員会は富山県立大学岩井学准教授が会長を務める砥粒加工学会内の専門委員会である。「ガラスと樹脂の同時切削工具の開発とレーザーによる PCD 工具の微細成形」と題し、講演した。聴講していたメンバーである日本工業出版社株式会社「機械と工具」編集部の記者より依頼があり、原稿の執筆に繋がった。

⑭（業績 7-5）精密工学会 切削加工専門委員会ワークショップ



Fig.6-14 精密工学会切削加工専門委員会ワークショップの様子

「ガラス樹脂積層材用のPCD小径エンドミルの開発」と題し、講演した。聴講していた委員会のメンバーが所属する難削材専門委員会での講演を依頼され、他の専門委員会での講演に繋がった。

⑮（業績 7-6）補助金獲得セミナー



Fig.6-15 補助金獲得セミナーの様子(左)と広告(右)

本セミナーは経済産業省のサポイン事業をはじめとする補助メニューの説明と、その獲得のコツを伝授するセミナーであり、「小規模企業でも勝ち取るためのサポイン対策」と題し、中小企業向けにサポインによる経営的な効果と、採択のためのノウハウを講演した。

⑯（業績 7-7）第 98 回中部レーザ応用技術研究会



Fig.6-16 第 98 回中部レーザ応用技術研究会の様子

中部レーザ応用技術研究会は名古屋を中心とした中部地域において研究会・フォーラムの開催、会誌の発行等を通してレーザ応用技術の発展、普及のための活動を行っている研究会である。沓名宗春特任教授が会長を務め、平成2年設立の歴史を誇る。「レーザ加工技術の最新動向：超短パルスレーザを用いたPCD工具成形技術の開発」と題し、講演した。

⑰ (業績 7-8) 精密工学会 第 98 回難削材加工専門委員会



Fig.6-17 第 98 回難削材加工専門委員会の様子

難削材加工専門委員会は精密工学会内の専門委員会であり、広島大学を中心として工具、工作機械、自動車、重工などのメーカーと機械加工を専門とする学術機関・公設試からなる会員によって活動している。「ガラスと樹脂の同時切削を可能とするPCDエンドミルの開発」と題して講演した。

⑱ (業績 7-9) 砥粒加工学会第 25 回未来志向形精密加工工具の開発に関する専門委員会



Fig.6-18 第 25 回未来志向形精密加工工具の開発に関する専門委員会の様子

「樹脂加工用工具への導電性 PCD の適用」と題し、講演した。聴講していたメンバーである日本工業出版社株式会社「機械と工具」編集部の記者より依頼があり、2018年3月号における「特集/切削工具が拓く新しい加工技術」の企画における原稿の執筆に繋がった。

①⑨ (業績 7-10) 精密工学会切削加工専門委員会ワークショップ



Fig.6-19 精密工学会切削加工専門委員会ワークショップの様子

砥粒学会での発表と IJAT の論文から講演に繋がった。

①⑩ (業績 7-11) 生産加工研究会第 67 回研究会



Fig.6-20 生産加工研究会第 67 回研究会の様子

生産加工研究会は、2000年に豊橋技術科学大学が周辺の産官学に呼び掛けて設立した、生産加工技術に関する研究会である。「レーザー加工技術を駆使した革新工具の開発」と題し、講演した。講演のきっかけは、2018年10月に精密工学会の学会誌において「木工工具からレーザー技術を駆使した革新工具へー高付加価値工具への限りなき挑戦ー」という題目の記事が取り上げられたことである。その記事を見た生産加工研究会事務局からの依頼で講演することとなった。

①⑪ (業績 7-12) 第 105 回中部レーザー応用技術研究会

L 社との連携に繋がった。

展示会は 5 度出展した。

② (業績 9-1) 三遠南信地域, 新技術・新工法展示商談会 in 刈谷



Fig.6-21 三遠南信地域, 新技術・新工法展示商談会 in 刈谷の様子

本展示会は三遠南信クラスター推進会議（事務局：浜松商工会議所工業振興課）の主催による、愛知県内、刈谷市内自動車関連企業等に、三遠南信地域の中小企業が保有する新技術や新工法を提案する展示商談会である。名刺交換件数は16件と少なかった。来場者数が少ないことを要因のひとつだが、樹脂切削工具をメインとした展示では、自動車業界の反響が少ないことが分かった。

③ (業績 9-2) メカトロテックジャパン 2015 (MECT2015)



Fig.6-22 メカトロテックジャパン 2015 の様子

メカトロテックジャパンは1987年にスタートした国内最大級の工作機械見本市である。西暦奇数年の秋に名古屋市のポートメッセなごや（名古屋国際展示場）で開催される。通算14回目となった2013年は464社・団体（1,747小間）が参加、約9万人が来場した。

「チップブレーカ付PCD工具」を出展・発表したところ、配布カタログ数182部、名刺交換数100件以上と大きな成果を上げた。前回の展示会の反省から、工具ユーザー目線に立った展示にするために、展示内容を商品ラインナップから切削事例集に転換した。その結果、様々な業界からの引き合いを得ることが出来た。また、チップブレーカによる切りくず排出動画が注目されたことから、切削試験と見える化の重要性を認識した。さらには、業界動向の情報が入手できたため、継続出展の方針を決めた。最終日は来客数が特に多く、接客

対応出来ない部分があったため、入場者数に合わせた人員配置が次回の展示会への課題である。

②④ (業績 9-3) テクニカルショウヨコハマ 2017 (第 38 回工業技術見本市)

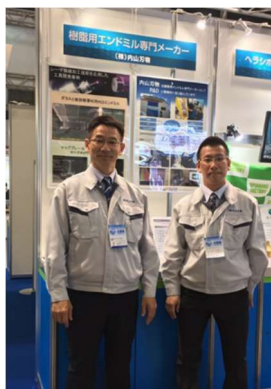


Fig.6-23 テクニカルショウヨコハマ 2017 の様子

工業技術見本市(テクニカルショウヨコハマ)は、公益財団法人神奈川産業振興センター、一般社団法人横浜市工業会連合会、神奈川県、横浜市が主催する展示会である。神奈川県下最大級の工業技術・製品に関する総合見本市として、県内産業の発展と経済の活性化に貢献してきた。本展示会では「ガラス樹脂積層材 PCD エンドミル」、「チップブレーカ付 PCD エンドミル」を展示したところ、名刺交換 数 47 件にのぼった。静岡県産業振興財団の静岡県ブースに出展したため、出展料が安く済んだことがメリットであった。しかし、対象業種が広くて切削の関係者が少なかったことが反省点である。

②⑤ (業績 9-4) 第 20 回関西機械要素技術展



Fig.6-24 第 20 回関西機械要素技術展の様子 展示(左)とカタログ(右)

関西機械要素技術展は、リードエグジビションジャパン株式会社の主催による、ベアリング、ねじ、ばねなどの機械部品や、金属・樹脂の加工技術、計測機・センサなどを集めた専門展である。「300 枚刃 PCD エンドミル」、「チップブレイカ付 PCD エンドミル」を出展したところ、名刺交換数は 42 件であった。関西方面への初出展だったため、関西の既存ユーザーに向けて PR 出来たことが成果である。フォトンバレーセンター内の出展であったため、出展料が安くできたこともメリットであるが、反面、光関係と思われた感あり。単独出展の必要性を感じた。

②⑥ (業績 9-5) メカトロテックジャパン 2017 (MECT2017)



Fig.6-25 メカトロテックジャパン 2017 の様子

出展形態 単独 1 小間

展示会補助金 活用

出展物 300 枚刃 PCD エンドミル、チップブレイカ付 PCD エンドミル

全来場者数 92,000 人

成果 名刺交換 128 人

- ・集客、営業成果とも今までの出展のなかで最も成功。
- ・300 枚刃 PCD エンドミルが評判になった。この工具は主催者でもあるニュースダイジェスト社の取材を受け「生産財マーケティング 2017 年 12 月号」にて記事として紹介された。自動車メーカ、大手工具メーカからの見学も多く、インパクトを与えた。
- ・同業他社のレーザによる工具成形ではナノ秒が多く、シャープエッジや粗さに課題あり。ピコ秒の優位性を確認した。
- ・工具は作るだけではだめ。評価出来なければ開発にならない。
→R&D センターの評判が良い→必要性を確認
- ・継続的に出展するべき。ブースの位置が良かったことから主催者との関係が重要。

公的資金は 8 回申請して、5 回採択された。採択されなかったものは、業績には載せなかったが、ここでは不採択分も合わせて検討の結果を記載した。

⑳ (業績記載なし) 平成 23 年度 産学官連携研究開発事業, 財団法人しずおか産業創造機構

「ガラス切削加工用エンドミルに関する研究開発」1 千万円, 期間 1 年間

申請 平成 23 年 12 月 1 日申請書提出, 平成 24 年 2 月 10 日プレゼン

結果 平成 24 年 3 月 7 日 **不採択**

敗因 プレゼンの質疑応答において「ガラスを切削できるエンドミルは既に存在する」との意見に的確な説明が出来なかったことが敗因と考えた。先行研究, 競合技術調査の必要性を痛感した。

㉑ (業績記載なし) 平成 25 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン), 経済産業省,

「タッチパネル向けガラス樹脂積層材用切削工具の開発」, 96 百万円, 期間 3 年間

申請 平成 25 年 6 月 14 日 申請書提出

結果 平成 25 年 7 月 31 日 **不採択**

敗因 技術面ではレーザ加工における予備実験の不足, ビジネスプランの内容も不十分であった。

対策

- ・申請書における技術面, 経営面の両方のブラッシュアップの必要性を痛感し, そのどちらのサポートも期待できる光産業創成大学院大学への入学を決意した。
- ・浜松工業技術支援センターと共同研究契約を結び, 超短パルスレーザを用いた PCD 加工の予備実験を開始した。
- ・発振器の選定実験 (波長, パルス幅, 平均出力, 繰返し周波数) を開始した。

㉒ (業績 11-1) 平成 26 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン)

申請 平成 26 年 6 月 6 日 申請書提出

結果 平成 26 年 7 月 28 日 **採択**

採択要因の分析

- ・不採択後は 1 年間に渡り, 光産業創成大学院大学と浜松工業技術支援センターとの共同研究を進め, 十分な予備実験を行ったことで, 開発の実現可能性を示すデータを示したと考えられる。
- ・光産業創成大学院大学における経営系の講義や指導によりビジネスプランをブラッシュアップできたことである。経営系の講義等により次の点が有効であったと考えられる。工具開発における成功要因 (KFS) 分析において, 市場分析, 競合技術との差別化, 自社の強みを明確化し, 開発の方向性を定めたことが重要であった。また, 仮設・検証プロセスの検討により, 課題を抽出し, 採るべき具体的な行動を決めたことが重要であった。さらには, システム思考により, 成功

するためには何か課題で、どうしたらよいかを検討したことが重要であったと考えられる。

- 成果
- ・研究開発体制を構築した。
 - ・資金を得て、レーザー加工装置を導入した。(第2章)
 - ・レーザー加工技術開発, 切削技術開発を行える環境・体制が整った。
 - ・工具開発の実績を作った。(第3章から第5章)



Fig.6-26 サポイン事業における研究推進委員会の様子

③⑩ (業績 11-2) 平成 29 年度 国内事業化可能性調査費補助金

平成 30 年度のサポイン申請の準備として、開発したダイヤモンド工具の市場性調査を行った。

③⑪ (業績記載なし) 平成 30 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン)

申請 平成 30 年 5 月 18 日 申請書提出

結果 平成 30 年 6 月 29 日 **不採択**

- 敗因
- ・サポイン採択レベルが上がっていることを実感した。説明会時に局の担当者が参加者に向かって、サポイン事業の経験の有無を質問したところ、主観ではあるが半数以上が挙手した。サポイン事業経験者同士の争いになっているため、それに対応した提案書の完成度レベルの向上が必要と考えられる。
 - ・国の施策との整合性の評価が低かったため、国が投資する価値の存在が不十分だったと分析した。国の施策を精査し、整合性を意識したテーマ設定の重要性を感じた。

- 成果
- ・川下企業との連携が強化された。
 - ・国プロへの申請により、川下企業からの技術的な信用度が増した。
 - ・ものづくり補助金等, 他の助成金と比べてサポインは川下企業へのインパクトがある。
 - ・採択されなくても、川下企業との共同開発がスタートすればメリットは十分にある。
 - ・申請書はビジネスプランを含み、会社のビジョンを描く作業でもある。第3者の

アドバイスにより、実現可能性を高めることができる。

- ・川下企業に研究開発を真剣に取り組む姿勢を示すことでサポイン事業におけるアドバイザー承諾の可能性が高まる。
- ・非採択の結果を受け、コンソーシアムメンバーが集結し、敗因を議論し、次の申請に向けての決意を表明することで、結束がより強まった。



Fig.6-27 平成 30 年度サポインのコンソーシアムメンバーによる反省会の様子

③② (業績 11-3) 平成 30 年度補正 ものづくり・商業・サービス経営力向上支援補助金
平成 30 年度に不採択だったサポイン申請のテーマの一部を切り取り、ものづくり補助金を申請した。サポイン申請は不採択の場合、他の補助金の申請に活用できるため、サポイン申請に要した投資は、十分に回収が可能である。

③③ (業績 11-4) 平成 30 年度 光・電子技術活用促進事業費補助金
令和元年のサポイン申請に繋がった。

③④ (業績 11-5) 令和元年度 戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン)
97.5 百万円, 期間 3 年間
申請 平成 31 年 4 月 24 日 申請書提出
結果 令和 元年 6 月 4 日 **採択**

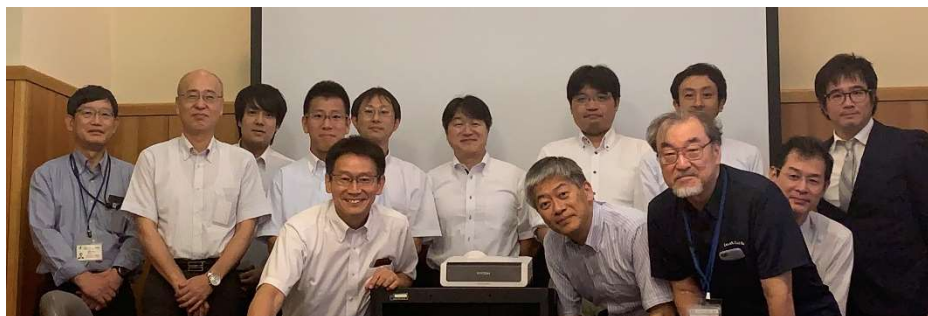


Fig.6-28 令和元年度サポインのコンソーシアムメンバー

成果 ・開発資金を調達した。

- ・川下企業との共同研究がスタートした。
- ・メンバーのモチベーションが向上した。
- ・採択要因としては、テーマと国の施策との合致性を考慮したことと考えられる。

論文は5件記載した。

③⑤ (業績 1-1) IJAT

本論文は令和元年度に採択したサポイン事業の基礎技術となっている。別刷りは川下企業への技術資料として配布された。

③⑥ (業績 1-2) レーザ加工学会

本論文の成果は、レーザーによる工具刃先の鋭利化に応用された。

③⑦ (業績 3-1) レーザ加工学会

本論文の別刷りは、展示会や川下企業との打合せにおいて研究実績、技術資料として配布された。

③⑧ (業績 3-2) 機械技術

別刷りは展示会や川下企業との打合せにおいて研究実績、技術資料として配布された。

③⑨ (業績 3-3) 機械と工具

別刷りは展示会や川下企業との打合せにおいて研究実績、技術資料として配布された。

記事は新聞記事と業界誌掲載分である。全部で11件である。新聞記事はローカル紙掲載と全国紙掲載とで大きな違いが出た。業界誌掲載は業界誌の知名度により違いが出た。ビジネスに繋がるためには、全国紙掲載と知名度の高い業界紙への掲載が重要であることがわかった。

④⑩ (業績 10-1) 月刊生産財マーケティング

展示会にて主催者の取材を受け、記事となった。

④⑪ (業績 10-2) 日本経済新聞, 静岡経済

日経産業新聞の記事へ繋がった。

④⑫ (業績 10-3) 日経産業新聞

川下企業の目に留まり、共同研究に繋がった。また、2018年のサポイン申請に繋がった。

④⑬ (業績 10-4) 中日新聞

地元での反響が大きかった。

④⑭ (業績 10-5) 日刊工業新聞社

官の立場から情報発信していただいた。

④⑮ (業績 10-6) 月刊生産財マーケティング

展示会にて主催者の取材を受け、記事となった。

- ④⑥ (業績 10-7) 日経トップリーダー
日経ビジネスオンラインへの掲載に繋がった。
- ④⑦ (業績 10-8) 日経ビジネスオンライン
ネット上で配信されているため、営業資料として使用されている。
- ④⑧ (業績 10-9) 精密工学会誌
専門委員会の講演に繋がった。
- ④⑨ (業績 10-10) 日刊工業新聞社
展示会の特集記事として取り上げられた。
- ⑤⑩ (業績 10-11) 平成 30 年度 元気な企業実態調査報告書Ⅱ
県の経済産業部に取り上げられた。

6-3-4 新規事業を起こすための検討

事業実践の経緯を観察したところ、産学官連携の枠組みで新規事業を起こすために重要なことは次の点と考えた。

- ・開発の推進は、産が主導的役割を果たすことが重要である。学は年度単位にて研究を進める場合が多く、できるだけ早い成果を求める産との時間的意識のずれが問題となる。そのため、産の主導により、研究開発のスピード化を図ることが重要である。
- ・産学の心構えとしては、互いの成果を認識し合うことが重要である。産は学の成果を意識し、学は産の成果を意識することである。一般的に産学官連携において、学は学術的成果や研究資金調達、産は早期の事業化を求めがちである。しかし、いずれかの成果が達成できないと、結果的にその産学官連携は失敗したと産と学がともに考えてしまう。本事例では連携体制を構築する際、産と学が協議を重ねて、学術的成果の設定、資金調達方法の選定と準備、事業化計画の作成を行ったため、連携体として成果を上げるとの意識が高まった。仮に成果が出なくても、自身だけが犠牲になったとの意識は少なくなると考えられる。よって、産学官連携の構築時に、互いの成果を意識することが重要である。
- ・次の成果に繋がることを意識した行動をとることが重要である。一つの成果が出るとさらに次の成果に繋がり、成果の連鎖が起こる。この流れが事業化に発展する。例えば、学会発表から、専門委員会の講演依頼に繋がり、委員会の聴講者から業界専門誌への執筆に繋がり、記事から川下企業からの問合せがあり、工具の共同開発に繋がった。つまり、一つの成果からすぐに事業化に発展することを期待するより、次の成果に繋がることを意識した行動をとることが重要である。
- ・繋がった要因は内容に新規性、話題性、将来性があることはもちろんのこと、成果を意識した連携が重要である。

- ・繋がりを仕掛けるためには、繋がる可能性の高い要素を選ぶことである。例えば、「補助金」を申請する際、学会発表に繋がる内容であるか？論文・記事になるか？展示会へ出品できるか？を考慮して補助金のテーマを選定する。「学会発表」であれば、論文や記事になるか？展示会へ出品できるか？補助金を獲れるか？を意識することである。
- ・小規模企業がサポインに採択されるためには、経験豊富な地域コーディネータが、サポイン申請の初期段階から小規模企業と協同して産学連携を推進することが重要である [10] .

以上から成功要因を検討してグラフ化したものを Fig.6-29 に示す。

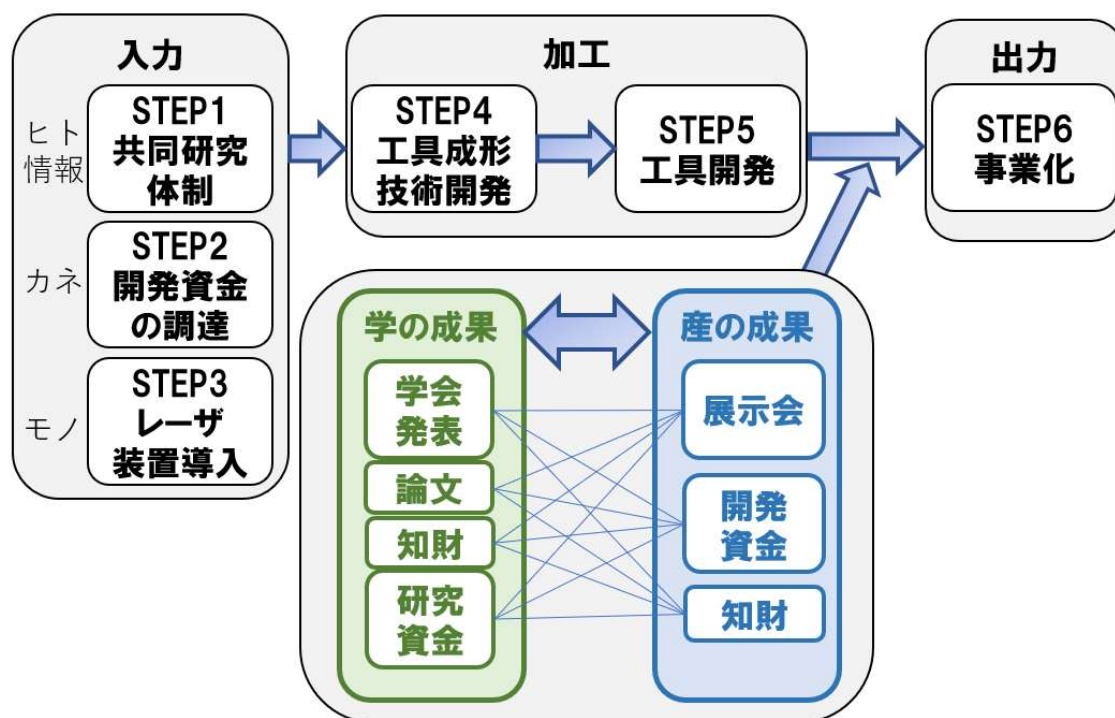


Fig.6-29 産学官連携の事例における成功要因

最終目標を事業化としたときの、そこに至るまでの過程を、入力・加工・出力という3区分を設定した。入力はヒト・カネ・モノ・情報の経営リソースであり、連携体制の構築、サポイン事業による開発資金の調達、レーザ工具装置の開発・導入の3点とした。加工は技術開発であり、レーザによる工具成形技術の開発と工具開発の2点とした。出力は事業化とした。

さらに事業化を推進させる成果に繋がる要素を7点設定した。それらは学会発表、論文、知財（学）、研究資金、展示会、開発資金、知財（産）である。学会発表、論文、知財、研究資金は学の成果、展示会、開発資金、知財は産の成果と考えられる。知財は両者に存在する。これらの要素を回してることが事業化を推進するために重要である。

Fig.6-29 にはいくつかの特徴がある。

- ・ 事業化を産学連携のゴールとして明確に設定した点である。
- ・ 共同研究体制構築の後に、直ちに資金調達の検討をした点である。
- ・ 産と学の成果を明確にしている点である。
- ・ 産と学、それぞれの成果が出やすいようにお互いが前向きに連携している点である。しかも、それらの成果は最終目標である事業化に向かっている。産にとっての目標は事業化であるが、従来の学の目標は研究資金の獲得に過ぎなかった。しかし、産学官連携を成功させるためには学の目標は単なる論文発表に留まらず、事業化のための論文発表と設定することが重要である。

以上のように、今後の新たな産学官連携を円滑に進めるため、レーザ加工を用いた工具開発の事例における成功要因を検討した。その結果、産学官連携を成功させるには、学の側の目標は単なる学術成果ではなく、学の側が「産の事業化のための論文発表」と目標を設定することが重要であり、産学官連携を円滑に進めると考えられる。また、本事例の分野に限らず他の分野の開発に当たっても、本研究の進め方は応用できる。

6-4 考察

6-4-1 産学連携による新規事業実践

小規模企業が新規事業を起こすためには何が必要で、何が重要かについて論じた。6年間の事業実践を観察した結果、小規模企業が新規事業を起こすためには、産と学が互いの成果を意識した産学連携と、川下企業（最終製品を組み立てる企業の意味）との連携を意識した補助金による資金調達が重要であることがわかった。

産と学が互いの成果を意識した産学連携とは、連携の構築時から互いの成果を協議し、共有することである。産学連携のゴールをあらかじめ設定するため、共同研究の方向性が定まり、共同研究のモチベーションにも繋がる。

川下企業との連携を意識した補助金とは、川下企業を巻き込んだ連携体制の構築と、マーケットインによる開発目標設定、ビジョンの明確化が可能となる補助金を選定することである。

産が学へ社会人入学することにより産学連携を構築した。小規模企業にとって大学との連携構築は敷居が高いが、社会人入学により、強固な連携を構築した。社会人入学したG大学には、光をキーワードとした様々な業種の人材が集まっており、教師や社会人学生間の交流により、人脈作りや情報収集に役立った。技術課題を解決するためのヒントが多く見つかった。

開発資金の調達には補助金が有効である。申請には労力が必要となる。しかし、その労力こそが、川下ニーズの収集、自社の強みの明確化、不足している経営リソースの確保、連携

体制の構築に繋がる。そして会社のビジョンの明確化に繋がったと考えられる。そのため、申請書の作成は経営者もしくは経営幹部が自ら作成することが重要である。申請書作成を外部委託する方法もあるが、それでは経営者自らが会社のビジョンを描くことにはならないため、資金調達のためだけの補助金活用となりかねない。サポイン事業管理団体の担当者によれば、サポイン事業の失敗例として、補助金を獲得しとことで満足してしまい、開発に身が入らないケースは補助事業が失敗し事業化に至らないとのことである。補助金によっては、求められる申請内容がことなるため、上記メリットが得られるサポインのような補助金を選定することも重要である。サポイン事業では、申請時に川下企業への綿密なヒアリングが必要である。逆に言えば、サポイン申請を理由に川下企業へのヒアリングを依頼することができる。何度か協議するうちに、川下企業との強固な連携体制の構築に繋がったと考えられる。

人材の確保には、学会抄録や論文が有効である。研究開発型企業を目指すU社にとって、学会抄録や論文は成果を形にする手段である。また、研究を実践している会社であるとのエビデンスになる。さらには、その分野に興味を持つ人材から注目されることが、専門性の高い人材の確保に繋がったと考えられる。

6-4-2 実践的なビジネス手法との比較

新規事業を起こすためのビジネス手法を調査した結果、6年間の事業実践は実践的なビジネス手法との間に共通点が見つかった。その中から、リーンスタートアップ[11]を取り上げ、比較・検討を行った。リーンスタートアップは、「構築-計測-学習」というフィードバックループを通じて、新しい製品やサービスを開発する際に、作り手の思い込みによって顧客にとって価値のないものを作ってしまうことに伴う、時間、労力、資源、情熱のムダをなくし、時代が求める製品・サービスを、より早く生みだし続けるためのビジネス手法であり、注目されている。

主な共通性として次の3点があった。

1つ目は小規模で参加しやすい講演会、展示会出展や、小規模な補助金への申請、発表しやすい講演会への参加等の活動を行い、その成果を検証し学習することで次の活動に繋げるというやり方は、フィードバックループとの共通性があった。50項目に及ぶ6年間の事業実践には当然のことながら成果の大小が存在した。何を選択すれば高い成果が得られるかは、当初は分からなかった。しかし、実践しながら成果を検証することによって、徐々に明確になった。例えば、学会や専門委員会の発表では下記に示すように成果が明らかになっていった。まずは様々な学会・専門委員会にて聴講し、発表内容や発表や質疑の方法、学会によるカラーに違い等の情報収集を行った。その結果、学会発表では一般的に学術的新規性が問われるが、実際には発表者によって、新製品や新技術の説明になっていると主観的に感じる場合があることがわかった。特に企業の発表ではその傾向は顕著である。つまり、自

社の強み等をまず発表し、会場内の専門家の意見を取り入れれば、少なくとも研究の妥当性の検証や方向性の修正ができると考えた。また、質疑者はその分野の専門家である確率が高いと考えられるため、発表後、直接、挨拶に行くことで人脈作りにも効果があった。さらには、その人脈により、分野にマッチした学会、専門委員会の情報収集も可能となり、成果を上げる可能性の高い学会、専門委員会の選定に有効であったと考えられる。

2つ目は検証・学習するために計測しなければならないものを明らかにし、次の活動を決める方法は、フィードバックループの計画を作成する手順と共通性があった。6年間の事業実践が50項目あるため、成果の検証方法そのものの検証が可能となった。例えば、補助金申請では申請自体に成果がることがわかった。一般的に補助金は採択されなければ、資金調達はできない。しかし、川下企業との連携体制が構築できることや川下ニーズを具体的に把握できる等、申請自体に成果があることがわかった。しかしこれは選択する補助金の種類によって異なるため、どの補助金を選択するかが重要である。

3つ目は製品化する前の技術開発段階において、学会発表や講演を行うことで、市場性や将来性、製品化の向けての課題が分かり、製品化のための方向性が明らかになっていった。これは実用最小限の製品を作り、顧客の反応から学習し、方向転換する進め方と共通性があった。学の成果と産の成果を顧客や市場の反応から評価し、学習することで、研究や開発の方向性を再検証することが重要である。

相違点として次の点が考えられる。

小規模企業において、上述のフィードバックループを1者で回すことは、経営リソースに乏しいため困難である。そこで、産に足りない技術を連携体制で補う。開発資金は補助金事業で補う。その際、産学連携と川下企業との連携を前提とするサポイン事業のような補助金を選択することが重要である。産はどの学と連携し、どの補助金を選択するかは、過去の経験や情報収集により学習することが重要である。

以上のように、6年間の事業実践とリーンスタートアップを比較・検討した結果、多くの共通点が見つかった。新規事業を起こすためには、フィードバックループを回すビジネス手法は有益である。しかし、小規模企業では経営リソース不足の問題があり、連携先と補助金の選定が重要である。

6-4-3 中小企業白書・科学技術基本計画への貢献

中小企業白書では中小企業が高度化を図ることが我が国製造業の国際競争力向上に資すると指摘しているが、中小企業が高度化するための具体的な方法に関する示唆は示されていない。また、科学技術基本計画ではイノベーション創出に向けた人材・知・資金の好循環システムの構築において、新規事業に挑戦する中小・ベンチャー企業の創出強化の必要性があげられているが、中小・ベンチャー企業が新規事業に挑戦する具体的な方法に関する示唆は示されていない。そのため、中小企業にとって、何をどのように進めれば良いか方向性が

わからないことが問題である。

本研究では下請け企業が研究開発型企业に成長するために、新規事業を起こすにはどうしたらよいかを検討してきた。6年間の事業実践を観察した結果、小規模企業が新規事業を起こすためには、産と学が互いの成果を意識した産学連携と、川下企業との連携を意識した補助金による資金調達が必要であることがわかった。それらに加え、科学技術基本計画、中小企業白書、小規模企業白書等の国の施策と方向性が合致しているかどうかを意識することが重要である。国の施策との合致は、共同研究者や協力者の理解を得られやすいだけでなく、補助金の採択にも大きく影響すると考えられる。

6-5 まとめ

第6章は小規模企業が新規事業を起こすことにより、下請け企業から研究開発型企业へ成長するための方向性について論じた。その結果、小規模企業が新規事業を円滑に進めるためには、次の3つの点が重要であることがわかった。それらは産と学が互いの成果を意識した産学連携、川下企業との連携を意識した補助金による資金調達、国の施策との整合性を意識することである。

では、この知見が中小企業白書と科学技術基本計画における問題の解決に繋がるのだろうか？国の施策レベルで検討するに当たっては、本研究の知見に加えて以下の検討が重要である。大手の川下企業を巻き込んだ産学連携を構築する、事業実践を進めるプレイヤーを増やす、そのプレイヤーが共に活動できる場を創出する。本研究の知見は、小規模企業の成長を促し、国の施策へも貢献するものと信ずる。

第 6 章の参考文献

- [1] 2019 年版中小企業白書全体版, 中小企業庁, 2019.
https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/2019/PDF/chusho/00Hakusyo_zentai.pdf, (参照 2019-07-05).
- [2] 中小企業のものづくり基盤技術の高度化に関する法律, 中小企業庁, 2006.
https://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/chikujou_kaisetu/index.htm, (参照 2019-05-23).
- [3] 2015 年版中小企業白書概要, 中小企業庁, 2015.
https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/H27/PDF/h27_pdf_mokujityuuGaiyou.pdf, (参照 2019-07-05).
- [4] 第 5 期科学技術基本計画本文, 内閣府, 2016.
<https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/5honbun.pdf>, (参照 2019-07-05) .
- [5] 2018 年版小規模企業白書, 中小企業庁, p.108, 2018.
<https://www.chusho.meti.go.jp/pamflet/hakusyo/H30/h30/shoukibodeta/index.html>, (参照 2019-07-05) .
- [6] 内山文宏, 松村隆, 西村公男, 上原義貴, 木工工具からレーザー技術を駆使した革新工具へ, 高付加価値工具への限りなき挑戦, 精密工学会誌, Vol.18, No.10, p.813-816, 2018.
- [7] 内山文宏, 超短パルスレーザーによる PCD 工具成形技術の開発: 小規模企業の産学官連携事例, レーザ加工学会誌, Vol.24, No.3, p.178-183, 2017.
- [8] 内山文宏, 江田英雄, 坪井昭彦, 小規模企業の産学官連携における KFS の検討, 産学連携学会第 17 回大会予稿集, 2019.
- [9] 中小企業庁 HP, 戦略的基盤技術高度化支援事業(サポイン事業),
<https://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/2018/181221mono.html>, (参照 2019-05-23).
- [10] 内山文宏, 江田英雄, 坪井昭彦, 小規模企業のサポイン対策と地域コーディネータを軸とした産学連携, 産学連携学会第 14 回大会予稿集, p.235, 2016.
- [11] E. RIES, The Lean Startup, How Today's Entrepreneurs Use Continuous Innovation to Create Radically Successful Businesses, CROWN BUSINESS, 2011.

第7章 本論文のまとめと今後の課題

7-1 総括

本論文は超短パルスレーザを用いた新たなダイヤモンド工具成形技術を開発することにより切削技術の向上を図ることについて論じた。また、小規模企業が新規事業を起こすことにより、下請け企業から研究開発型企業へ成長するための戦略について論じた。

研究の結果、以下の結論を得た。

ダイヤモンド工具刃先の成形には超短パルスレーザのうち UV ピコ秒が有効である。レーザを用いた工具成形技術の開発により、複合材や難削材に対応した PCD 工具の開発が可能となった。さらに、レーザ加工によりストラクチャを付与した PCD 工具の実現と最適な切削条件の選定により、加工面粗さを制御できる切削技術を確立し、切削技術の向上が図れた。以上より、超短パルスレーザを用いたダイヤモンド工具成形技術は切削技術の向上に有効であるとの結論を得た。

小規模企業が新規事業を起こすことにより、下請け企業から研究開発型企業へ成長するためには、産と学が互いの成果を意識した産学連携と、川下企業との連携を意識した補助金による資金調達、国の施策との整合性を意識することの3点が重要であるとの結論を得た。

新たな工具成形技術の開発には、レーザによる微細加工技術を応用した。超短パルスレーザを搭載した工具成形機を開発・導入し、PCD 工具成形技術を開発した。そして、2つの工具開発と1つの切削技術の開発を実践した。

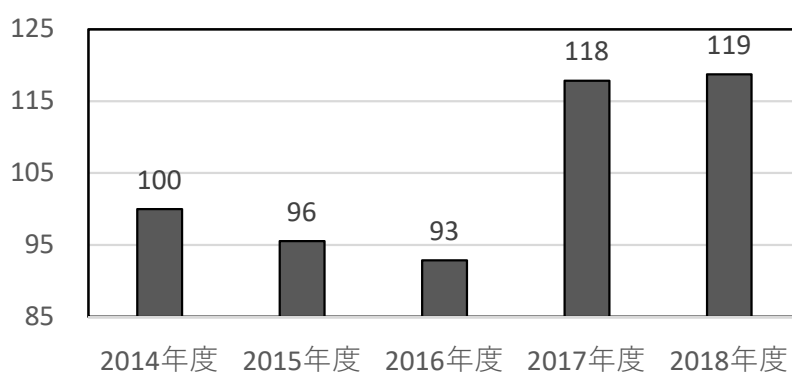
1つ目の工具開発はガラス樹脂積層材用工具である。硬脆材料であるガラスと粘弾性材料である樹脂では加工特性が全く異なるため、同時加工が困難である。そこで、1本の工具にガラスを加工できる刃と樹脂を加工できる刃を成形することで、ガラスと樹脂の同時加工できる工具を、レーザ微細加工技術を用いて開発した。

2つ目の工具開発は軟質樹脂用工具である。カーナビゲーションの車載用タッチパネルでは、カバー材として多用されているポリカーボネート等の軟質樹脂は溶けて切りくずが詰まりやすいため、加工面品位や工具寿命の低下が問題となっている。そこで、レーザ加工を用いて PCD 工具にチップブレーカ加工を施すことで、切りくず排出性を改善する工具を開発した。

切削技術の開発は、加工面粗さを制御可能とする技術である。超短パルスレーザを用いたストラクチャ付 PCD 工具の実現と、開発した表面形状シミュレーションによる任意の加工面粗さを実現するための切削条件の選定をおこなった。その結果、数 μm から数十 μm の加工面粗さを、切削条件を変えるだけで実現する技術を確立した。

在学中のビジネス実践の経緯から積極的に学び取ることで、小規模企業が下請け企業から研究開発型企业へ成長するために新規事業を起こす方法を検討した結果、産と学が互いの成果を意識した産学連携と、川下企業との連携を意識した補助金による資金調達、国の施策との整合性を意識することが重要であるとの結論を得た。

以上の研究により得られた成果を、会社の売上と切削試験の回数により示す。2014年度から2018年度の5年間の会社の売上推移をFig.7-1に示す。縦軸の数値は、2014年度の売上金額を100とし、そこからの変化量を表している。



(2014年度の売上金額を100としている)

Fig.7-1 会社の売上推移

本業である樹脂用工具の受注が減少しているため、2016年度までは売り上げは減少傾向だった。しかし、2017年度以降、売上金額は増加に転じた。2018年度は、2014年度からは19%増、底値である2016年度からは28%増となった。2017年度以降は、開発した工具の売上と新規工具開発件数の増加により、急速に売り上げを伸ばした。

新規工具開発の数量を切削試験回数に置き換えて考え、切削試験回数の推移をFig.7-2に示す。

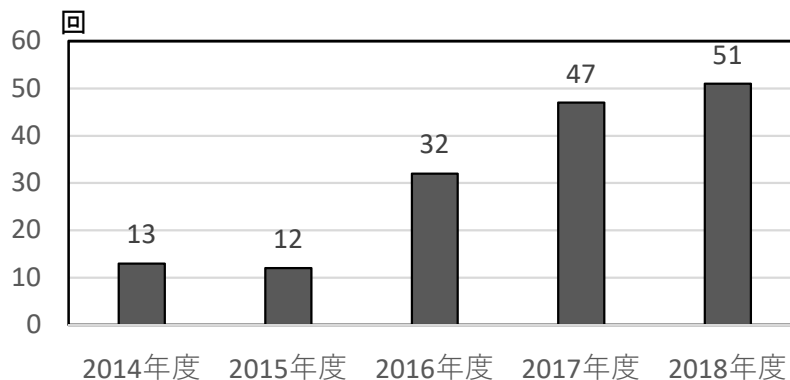


Fig.7-2 切削試験回数の推移

2016 年度から切削試験の回数は増加している。2018 年度は 2014 年度や 2015 年度と比べて約 4 倍に増加している。これはサポイン事業の成果として、開発した工具からの引き合いが増えたためと考えられる。また、サポイン採択を契機に 2017 年 1 月に開所した R&D センター (Fig.7-3) の影響が大きい。



Fig.7-3 R&D センター

R&D センターには、切削試験 (Fig.7-4) を行うための工作機械と、Fig.7-5 のような測定器 (レーザ顕微鏡, ハイスピードカメラ, 切削動力計, 走査型電子顕微鏡, マイクロスコープ等) を備えている。工具や加工面を観察・測定するための、切削状況の把握や工具の評価を行う施設である。



Fig.7-4 切削試験の様子



Fig.7-5 R&D センター内の測定器

切削試験が増えた要因としては、工具開発の依頼件数が増加したためである。2014 年度では 2 件だったが、2018 年度は 11 件と増加している。

以上のように、本研究の成果は、工具開発の依頼件数の増加、切削試験回数の増加として表れており、今後も増加すると見込まれる。

本研究により開発したレーザによる PCD 工具成形技術は、PCD 工具の新たな可能性を広げるものである。硬脆材料や軟質材料、またそれらの複合材までも切削可能とする技術であり、切削技術を大きく進歩させるものである。

小規模工具メーカーが工具開発という新規事業を立ち上げた事例から学ぶことで、小規模企業が新規事業を起こすための方向性を示した。本研究の成果は小規模企業の成長と、切削技術の発展を促し、素材産業をはじめとする日本のものづくりの発展と国際競争力の向上に寄与するものである。

本研究を通じて、私のための光産業創成とは、レーザを用いた工具開発事業を起こすことで、日本のものづくりの発展に寄与することである。その際、重要なことは、産と学が互いの成果を意識した産学連携と川下企業との連携を意識した補助金である。

7-2 今後の課題

今後の課題は3つある。

1つ目は、研究実施体制の整備である。第5章（ストラクチャ付工具による加工面粗さ制御技術の開発）を発展したテーマが、令和元年度に採択されたサポイン事業のテーマである。博士研究は終了しても、サポイン事業を通じた共同研究は継続するため、今後の研究実施体制の整備が課題である。

2つ目は、持続的な発展の仕組み作りである。事業を続けている限り、工具開発に終わりはしない。市場の変化に柔軟に対応し、持続的な発展の仕組み作りが必要となる。

3つ目は、後継者育成である。技術は人である。技術を継承・発展させるためには、自ら研究を推進できる人材を育てることである。

上記3つの課題をクリアするためには、高い技術的下地を有し、かつビジネス的なバランス感覚と、技術開発のマネジメント能力を有する人材の育成が必要である。そのためにサポイン事業のような連携体制の構築を必要とする補助金事業の推進と、その研究内容をテーマとした博士研究を通じての人材育成に積極的に取り組んでいく。

7-3 おわりに

本博士研究は6年間に及んだ。その間に、産学官連携、サポイン事業、レーザ装置の導入、レーザ加工技術の開発、工具開発と進み、その事業化の成果は既に会社の売上の一角をなしている。大きな変化が6年間に凝縮されていると感じる。そしてこれらは、次の産学官連携、次のサポイン事業、次の技術開発に繋げていかなければならない。そのために、小規模企業が新規事業立ち上げるため方向性の示唆は重要な役割を果たすことになる。本論文が、次の世代を担う若者たちに何かしらの指針になることを願ってやまない。

図表一覧

Table1-1 製造業における素材産業の位置づけ.....	1
Table1-2 製造業における情報通信機械器具と輸送用機械器具の位置づけ.....	1
Table1-3 加工技術の分類と加工原理.....	2
Fig.1-4 本論文の構成.....	5
Fig.2-1-1 Processing classification.....	7
Fig.2-1-2 Processing technology.....	8
Fig.2-1-3 PCD(Poly Crystalline Diamond).....	8
Fig.2-1-4 Material of cutting tool.....	9
Fig.2-1-5 Production value: Machine tools_diamond tools_diamond cutting tools (cutting tools, cutters, reamers, drills, milling cutters, end mills, etc.).....	9
Fig.2-1-6 PCD end mill.....	10
Fig.2-1-7 Cutting plastic with PCD end mill.....	10
Fig.2-1-8 Tool forming method.....	10
Table2-1-9 Suitability of laser oscillator (investigation).....	11
Table 2-1-10 Suitability of laser oscillator (experiment).....	12
Table2-1-11 Laser parameters.....	12
Fig.2-1-12 Surface Roughness.....	13
Fig.2-1-13 Ultrashort pulse laser fabrication system.....	14
Fig.2-1-14 Tool forming machine with ultrashort pulse laser.....	14
Table2-1-15 PCD grade and particle size.....	14
Fig.2-1-16 Relationship between wavelength and reflectance.....	15
Fig.2-1-17 Beam pass.....	16
Fig.2-1-18 PCD removal.....	16
Table2-1-19 IR laser parameters.....	16
Fig.2-1-20 Relationship between fluence and processing depth in IR picosecond laser.....	16
Fig.2-1-21 Relationship between scanning speed and surface roughness in IR picosecond.....	17
Table2-1-22 UV laser parameters.....	18
Fig.2-1-23 Relationship between fluence and processing depth in UV picosecond laser.....	18
Fig.2-1-24 Relationship between scanning speed and surface roughness in UV.....	18
Fig.2-1-25 Raman spectroscopy results.....	19
Table2-1-26 Change of diamond content.....	20
Fig.2-2-1 Sharpness of the tool edge.....	21
Fig.2-2-2 Comparison of cutting edges.....	22

Fig.2-2-3 Comparison of Roughness Ra.....	22
Fig.2-2-4 Comparison of Sharpness of the tool edge.....	23
Fig.2-2-5 Comparison of conventional technology and ultrashort pulse laser.....	23
Fig.2-2-6 PCD endmill.....	24
Table2-2-7 Cutting parameters.....	24
Fig.2-2-8 Cutting surface comparison. Cutting surface by cutting tool finished using laser.....	24
Fig.3-1 Glass resin laminated material.....	28
Fig.3-2 Results of a test in which 130 g of a rigid ball was dropped from a height of 2 m.....	28
Table3-3 Characteristics of glass resin laminate.....	29
Fig.3-4 Cutting surface of glass with cutting tool.....	29
Fig.3-5 Cutting surface of resin with grinding tool.....	30
Fig.3-6 Target material and experimental PCD endmill.....	30
Fig.3-7 PCD end mill.....	31
Table3-8 Cutting parameters.....	31
Fig.3-9 Early in tool development.....	32
Fig.3-10 PCD end mill.....	32
Fig.3-11 Improved chip discharge.....	32
Fig.3-12 Cut simulation.....	33
Fig.3-13 Experimental results of milling.....	33
Fig.3-14 Multi-edges PCD end mill.....	34
Table3-15 Cutting parameters.....	34
Fig.3-16 Surface finish.....	35
Fig.4-1 Car navigation panel.....	38
Fig.4-2 Car Navigation / PND / DA Global Market Trend and Forecast.....	39
Fig.4-3 Cutting situation clogged with chips.....	39
Fig.4-4 PCD endmill for soft resin cut.....	40
Table4-5 Cutting parameters.....	40
Fig.4-6 Cutting condition.....	40
Fig.4-7 Comparison of the cutting force.....	41
Fig.4-8 Distribution of cutting force.....	41
Fig.4-9 The reductional effect of cutting force.....	42
Fig.4-10 Comparison of chip.....	42
Fig.4-11 FFT analysis result.....	42
Fig.4-12 Cutting test tool.....	43

Table4-13 Cutting parameters.....	43
Fig.4-14 The effect of the chip breaker by observation of a high-speed camera.....	43
Fig.5-1 2D Cutting Model.....	46
Fig.5-2 Structured end mill.....	47
Fig.5-3 Cutting surface by roughing end mill.....	48
Fig.5-4 Edge parameters of end mill.....	49
Fig.5-5 Structured PCD end mill (Diameter ϕ 6mm) formed by laser processing.....	49
Fig.5-6 Cutting operation with inclined spindle.....	50
Fig.5-7 Milling with a vertical spindle.....	50
Fig.5-8 Milling with an inclined spindle.....	51
Fig.5-9 Analytical model.....	51
Fig.5-10 Surface profiles.....	53
Fig.5-11 Cutting test.....	54
Fig.5-12 Structured tool.....	54
Table5-13 Cutting parameters.....	54
Fig.5-14 Surface finishes.....	55
Fig.5-15 Simulations of Surface finishes.....	56
Fig.5-16 Surface profiles.....	57
Fig.5-17 Maximum surface roughnesses for cutting parameters.....	58
Fig.5-18 Maximum surface roughnesses for feed rate.....	58
Fig.5-19 Adhesions on the surfaces.....	59
Table6-1 中小企業基本法の定義.....	63
Table6-2 中小企業基本法の企業数, 従業者数.....	63
Fig.6-3 高収益企業と低収益企業の売上高形状利益率(製造業).....	65
Fig.6-4 産学官連携の事例における共同研究体制.....	67
Table6-5 6つのSTEP.....	68
Table6-6 成果のまとめ.....	68
Fig.6-7 産学連携学会第14回大会の様子.....	72
Fig.6-8 第17回国際工作機械技術者会議の様子 展示(左) プレゼン(右).....	73
Fig.6-9 日本機械学会 第12回生産加工・工作機械部門講演会の様子.....	74
Fig.6-10 第18回国際工作機械技術者会議の様子.....	74
Fig.6-11 第9回研究・開発成果発表会の様子 口頭発表(左) ポスター発表(右).....	75
Fig.6-12 精密工学会切削加工専門委員会の様子.....	75
Fig.6-13 磐田信用金庫第17回いわしん中小企業支援セミナーの様子(左)と広告(右).....	76

Fig.6-14	精密工学会切削加工専門委員会ワークショップの様子.....	77
Fig.6-15	補助金獲得セミナーの様子(左)と広告(右).....	77
Fig.6-16	第98回中部レーザ応用技術研究会の様子.....	78
Fig.6-17	第98回難削材加工専門委員会の様子.....	78
Fig.6-18	第25回未来志向形精密加工工具の開発に関する専門委員会の様子.....	78
Fig.6-19	精密工学会切削加工専門委員会ワークショップの様子.....	79
Fig.6-20	生産加工研究会第67回研究会の様子.....	79
Fig.6-21	三遠南信地域, 新技術・新工法展示商談会 in 刈谷の様子.....	80
Fig.6-22	メカトロテックジャパン 2015 の様子.....	80
Fig.6-23	テクニカルショウヨコハマ 2017 の様子.....	81
Fig.6-24	第20回関西機械要素技術展の様子 展示(左)とカタログ(右).....	81
Fig.6-25	メカトロテックジャパン 2017 の様子.....	82
Fig.6-26	サポイン事業における研究推進委員会の様子.....	84
Fig.6-27	平成30年度サポインのコンソーシアムメンバーによる反省会の様子.....	85
Fig.6-28	令和元年度サポインのコンソーシアムメンバー.....	85
Fig.6-29	産学官連携の事例における成功要因.....	88
Fig.7-1	会社の売上推移.....	95
Fig.7-2	切削試験回数の推移.....	95
Fig.7-3	R&D センター.....	96
Fig.7-4	切削試験の様子.....	96
Fig.7-5	R&D センター内の測定器.....	96

謝辞

本論文の執筆にあたり、光産業創成大学院大学の坪井昭彦先生から、終始懇切丁寧なるご指導とご鞭撻、ご高配を賜りましたことを心から深く感謝いたします。

分野ゼミでは沖原伸一郎先生、楠本利行先生、杓名宗春先生、森清和先生から、本研究の遂行にあたり、多くのご指導ご助言をいただきましたことを感謝申し上げます。研究と事業実践の機会を与えていただき、また、レーザー発振器の選定において鍵となるご助言をいただきました学長の瀧口義浩先生に深く感謝いたします。経営系の学会発表、論文執筆、さらには特許出願においてご指導頂きました江田英雄先生に深く感謝いたします。講義や活動においてご指導を賜りました、増田靖先生、藤田和久先生、石井勝弘先生、姜理恵先生、内藤康秀先生、横田浩章先生、森芳孝先生、花山良平先生、平野美奈子先生、宇佐美健一先生、神谷好人先生、藤田雅之先生、金岡優先生、田口伸先生、高谷周司先生に深く感謝いたします。特許出願にあたり京都北山特許法律事務所の西村竜平先生に感謝の意を表します。入学時にご指導をいただきました元学長の加藤義章先生、北原正先生、部谷学先生に深く感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、東京電機大学の松村隆先生からは切削技術に関するご教授、切削試験環境整備に関するご助言、多数回にわたる実験におけるご指導、助成金申請におけるご指導、査読論文におけるご指導、川下企業や連携企業のご紹介など、多岐に渡るご指導をいただきましたことを深く感謝申し上げます。

本研究における切削試験やレーザー照射実験の遂行にあたり、6年間に静岡県工業技術研究所浜松工業技術支援センターに在籍もしくは在籍されたことのある山下清光様、植松俊明様、伊藤芳典様、菊池圭祐様、渥美博安様、小松剛様、鷺坂芳弘様、是永宗祐様、大澤洋文様から多くのご協力をいただきましたことを感謝いたします。

本研究の遂行にあたり、サポイン事業を通じて浜松地域イノベーション推進機構の米谷俊一氏、林豊氏、西野直也氏をはじめ同機構の皆様方から多くのご協力を頂きましたことを感謝いたします。

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事務局長の大木清造様、サポインやIMECの事務手続きでお世話になりました石山貴之様、ものづくり中核人材講座よりお世話になりました加藤奈穂様をはじめ、村田浩二様、菅沼聖子様、原田真理様、鈴木朝子様、森秋子様、伊藤邦司様に心から感謝いたします。

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西村靖彦様、真鍋武士様、光加工・プロセス分野のゼミで長きに渡りお世話になりました武田信秀様、刀原寛孝様、前田利光様、八木慎太郎様、坂井光蔵様、蒲原正広様、池田剛司様、酒井浩一様、鈴木一広様、鈴木那津輝様、安田忠史様、舟山博人様、安田浩一郎様、芝原利之様、國府田京司様、岡崎元樹様、野原貴広様、他、光産業創成大学院大学に所属の学生の方々に心から感謝いたしま

す。

仕事との兼ね合いと研究を支えてくれた株式会社内山刃物の工場長 伊藤明彦様，三井政幸様，鈴木郁昭様，村木真規子様，武田貞夫様，井上雄貴様，馬場祐子様，田中淳子様，中尾有里様に心から感謝いたします。

最後に，大学への入学を後押してくれて，博士号の取得を楽しみにしていた父（故），丈夫な体に育ててくれた母，生活面心身面を支えてくれた妻 真帆，会社の将来を担う決意をしてくれた長男 稜太，大きな笑い声で応援してくれた長女 奈々美に深く感謝します。

2019年9月 内山文宏

業績目録

1. 論文（査読あり）

- [1] Fumihiro Uchiyama, Akihiko Tsuboi, Takashi Matsumura, Surface Profile Analysis in Milling of Structured Tool, International Journal of Automation Technology, Vol.13, No.1, p.101-108, 2019.
- [2] 部谷学, 武田信秀, 内山文宏, 沖原伸一郎, 坪井昭彦, ナノ秒パルス固体レーザー照射による炭素鋼 S45C の静摩擦係数の低減, レーザ加工学会誌, Vol.23, No.2, p.159-167, 2016.

2. 国際会議抄録

- [1] Fumihiro Uchiyama, Toshiyuki Kusumoto, Akihiko Tsuboi, Kiyomitsu Yamashita, Akihiko Ito, Takashi Matsumura, Development of PCD micro end mills formed by ultrashort pulse laser, The 17thInternational Machine Tool Engineers' Conference(IMEC) , 2016.
- [2] Fumihiro Uchiyama, Toshiyuki Kusumoto, Akihiko Tsuboi, Keisuke Kikuchi, Toshiaki Uematsu, Takashi Matsumura, Structured PCD end mill and applications, The 18th International Machine Tool Engineers' Conference(IMEC) , 2018.

3. 論文（査読なし）

- [1] 内山文宏, 超短パルスレーザーによる PCD 工具成形技術の開発：小規模企業の産学官連携事例, レーザ加工学会誌, Vol.24, No.3, p.178-183, 2017.
- [2] 内山文宏, 超短パルスレーザーによる微細成形技術を用いた PCD 小径エンドミルの開発, 機械技術, Vol.65, No.7, p.69-73, 日刊工業新聞社プロダクション, 2017.
- [3] 内山文宏, ガラス樹脂積層材加工用工具の開発(特集 切削工具が拓く新しい加工技術), 機械と工具, Vol.8, No.3, p.16-20, 日本工業出版, 2018.

4. 学会抄録

- [1] 内山文宏, 江田英雄, 坪井昭彦, 小規模企業のサポイン対策と地域コーディネータを軸とした産学連携, 産学連携学会第 14 回大会予稿集, p.235, 2016.
- [2] 内山文宏, 楠本利行, 坪井昭彦, 松村隆, ガラス樹脂積層材切削用の PCD 小径エンドミルの開発, 2016 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2016)講演論文集, p.41-42, 2016.
- [3] 内山文宏, 楠本利行, 坪井昭彦, 山下清光, 伊藤明彦, 松村隆, 超短パルスレーザーによる微細成形技術を用いた PCD 小径エンドミルの開発, 第 17 回国際工作機械技術者会議 (IMEC2016) 論文集, 2016.
- [4] 内山文宏, 萩本幸恵, 岩井学, 古賀文雄, ニノ宮進一, 鈴木清, ボロンドープダイヤモンドを利用した PCD 工具による難加工材の切削加工第 2 報: 樹脂加工用工具への適用, 2017 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2017)講演論文集, p.97-98, 2017.
- [5] 内山文宏, 楠本利行, 坪井昭彦, 松村隆, PCD(多結晶ダイヤモンド)工具刃先成形のための超短パルスレーザー加工技術の開発, レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会抄録集, 2018.
- [6] 内山文宏, 坪井昭彦, 松村隆, 微細ストラクチャエンドミルの傾斜回転における仕上げ面プロファイル, 日本機械学会 第 12 回生産加工・工作機械部門講演会論文集, p.A10, 2018.
- [7] 内山文宏, 楠本利行, 坪井昭彦, 植松俊明, 菊池圭祐, 松村隆, ストラクチャ付 PCD 工具とその応用, 第 18 回国際工作機械技術者会議(IMEC2018)抄録集, 2018.

5. 学会発表

- [1] 内山文宏, 江田英雄, 坪井昭彦, 小規模企業のサポイン対策と地域コーディネータを軸とした産学連携, 産学連携学会第 14 回大会, アクトシティ浜松, 2016 年 6 月 17 日発表.
- [2] 内山文宏, 楠本利行, 坪井昭彦, 松村隆, ガラス樹脂積層材切削用の PCD 小径エンドミルの開発, 2016 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2016), 兵庫県立大学, 2016 年 9 月 1 日発表.

- [3] 内山文宏, 楠本利行, 坪井昭彦, 山下清光, 伊藤明彦, 松村隆, 超短パルスレーザーによる微細成形技術を用いた PCD 小径エンドミルの開発, 第 17 回国際工作機械技術者会議(IMEC), 東京ビックサイト, 2016 年 11 月 20 日発表.
- [4] 内山文宏, 萩本幸恵, 岩井学, 古賀文雄, ニノ宮進一, 鈴木清, ボロンドープダイヤモンドを利用した PCD 工具による難加工材の切削加工第 2 報: 樹脂加工用工具への適用, 2017 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2017), 福岡工業大学, 2017 年 8 月 30 日発表.
- [5] 内山文宏, 楠本利行, 坪井昭彦, 松村隆, PCD(多結晶ダイヤモンド)工具刃先成形のための超短パルスレーザー加工技術の開発, レーザー学会学術講演会第 38 回年次大会, 京都市勧業館みやこめっせ, 2018 年 1 月 24 日発表.
- [6] 内山文宏, 坪井昭彦, 松村隆, 微細ストラクチャエンドミルの傾斜回転における仕上げ面プロファイル, 日本機械学会 第 12 回生産加工・工作機械部門講演会, 兵庫県立大学, 2018 年 10 月 13 日発表.
- [7] 内山文宏, 坪井昭彦, 江田英雄, 小規模企業の産学官連携における KFS の検討, 産学連携学会第 17 回大会, 奈良県文化会館, 2019 年 6 月 21 日発表.

6. 成果発表

- [1] 内山文宏, 軟質樹脂用 PCD(多結晶ダイヤモンド)エンドミルの開発: 超短パルスレーザーによるチップブレイカの効果, 第 9 回研究・開発成果発表会, 静岡県工業技術研究所 浜松工業技術支援センター, 2016 年 7 月 1 日発表.

7. 招待講演

- [1] 内山文宏, 今が最高におもしろい, 浜松南高 OB 講話, 静岡県立浜松南高等学校, 2014 年 9 月 26 日講演.
- [2] 内山文宏, 楠本利行, 坪井昭彦, 松村隆, ガラスと樹脂の同時切削における課題と工具開発, 精密工学会切削加工専門委員会, 東京電機大学, 2016 年 6 月 24 日講演.
- [3] 内山文宏, 超短パルスレーザーによるダイヤモンド工具成形技術の開発, 磐田信用金庫第 17 回いわしん中小企業支援セミナー: 中小企業経営者のための光技術活用セミ

- ナー, アクトシティ浜松 コンgressセンター, 2016年7月7日講演.
<http://www.iwashin.co.jp/notice/detail/?id=555>, (参照 2019-05-23).
- [4] 内山文宏, ガラスと樹脂の同時切削工具の開発とレーザーによるPCD工具の微細成形, 砥粒加工学会 第22回FT専門委員会, 埼玉大学東京ステーションカレッジ, 2016年9月23日講演.
- [5] 内山文宏, 楠本利行, 坪井昭彦, 松村隆, ガラス樹脂積層材用のPCD小径エンドミルの開発, 精密工学会切削加工専門委員会ワークショップ, 山形県高度技術研究開発センター, 2016年11月25日講演.
- [6] 内山文宏, 小規模企業でも勝ち取るためのサポイン対策, 浜松地域イノベーション推進機構, 浜松市, 補助金獲得セミナー, グランドホテル浜松, 2017年2月22日講演.
<https://www.hamamatsu-cci.or.jp/events/show/662>, (参照 2019-05-23).
- [7] 内山文宏, レーザ加工技術の最新動向: 超短パルスレーザーを用いたPCD工具成形技術の開発, 第98回中部レーザー応用技術研究会, 名古屋市工業研究所, 2017年3月6日講演.
- [8] 内山文宏, ガラスと樹脂の同時切削を可能とするPCDエンドミルの開発, 精密工学会, 第98回難削材加工専門委員会, 広島ガーデンパレス, 2017年6月13日講演.
- [9] 内山文宏, 樹脂加工用工具への導電性PCDの適用, 砥粒加工学会 第25回FT専門委員会, 日本工業大学, 2017年6月21日講演.
- [10] 内山文宏, 坪井昭彦, 松村隆, 微細ストラクチャエンドミルの傾斜回転における仕上げ面プロファイル, 精密工学会切削加工専門委員会ワークショップ, あきた芸術村, 2018年10月19日講演.
- [11] 内山文宏, レーザ加工技術を駆使した革新工具の開発, 生産加工研究会第67回研究会, 豊橋技術科学大学, 2018年11月30日講演.
- [12] 内山文宏, 超短パルスレーザーを用いた切削工具の開発, 第105回中部レーザー応用技術研究会, 名古屋市工業研究所, 2018年12月7日講演.

8. 特許

- [1] 【公開番号】 特開 2014-161929(P2014-161929A)
【公開日】 平成 26 年 9 月 8 日(2014.9.8)
【発明の名称】 積層材用切削工具
【発明者】 内山 文宏
【出願人】 株式会社 内山刃物

- [2] 【公開番号】 特開 2017-154936(P2017-154936A)
【公開日】 平成 29 年 9 月 7 日(2017.9.7)
【発明の名称】 切削具
【発明者】 内山 文宏
【出願人】 株式会社 内山刃物

9. 展示会出展

- [1] 三遠南信地域, 新技術・新工法, 展示商談会 in 刈谷, 刈谷市産業振興センター,
2014 年 3 月 6 日～7 日.
<https://www.hamamatsu-cci.or.jp/news/show/471>, (参照 2019-05-23).

- [2] メカトロテックジャパン 2015 (MECT2015), ポートメッセなごや,
2015 年 10 月 21 日～24 日.
<http://mect-japan.com/2015/>, (参照 2019-05-23).

- [3] テクニカルショウヨコハマ 2017 (第 38 回工業技術見本市), パシフィコ横浜,
2017 年 2 月 1 日～3 日.
<https://www.tech-yokohama.jp/tech2017/index.html>, (参照 2019-05-23).

- [4] 第 20 回関西機械要素技術展, インテックス大阪,
2017 年 10 月 4 日～6 日.
<http://www.mtech-kansai.jp/about/Previous-Show-Report/>, (参照 2019-05-23).

- [5] メカトロテックジャパン 2017 (MECT2017), ポートメッセなごや,
2017 年 10 月 18 日～21 日.
<http://mect-japan.com/2017/>, (参照 2019-05-23).

10. マスメディア等による紹介

- [1] 「光る中小企業」, 月刊生産財マーケティング, Vol.52, No.12, p.74, ニュースダイジェスト社, 2015年12月号.
- [2] 「液晶向け樹脂・ガラス複合材 同時に削れるダイヤモンド工具 内山刃物が特許申請」, 日本経済新聞, 静岡経済 p.35, 2016年7月6日朝刊.
- [3] 「樹脂とガラスの複合材 ダイヤで同時に切削 内山刃物, 工具を開発」, 日経産業新聞, p.12, 2016年7月20日.
- [4] 「スマホなどに需要 ガラス樹脂積層材 一体で削れる機械用工具」人ひと言「試行錯誤理想の11枚刃」, 中日新聞, 2016年10月22日朝刊.
- [5] 「産学官連携を活かした金型・成形技術の高度化人材育成」, 型技術, Vol.32, No.11, p.50-51, 日刊工業新聞社, 2017年10月号.
- [6] 「市場を切り開く革新工具 レーザで工具に付加価値 新しい市場を開拓」, 月刊生産財マーケティング, Vol.54, No.12, p.60-61, ニュースダイジェスト社, 2017年12月号.
- [7] 「疑問解決 社長はなぜ大学院に通うのか 会社の将来を担う事業を見つけた」, 日経トップリーダー, No.405, p.76-77, 日経BP社, 2018年6月号.
- [8] 「中小企業の社長はなぜ大学院に通うのか 「現場の勘」と「新たな知識」から起きるイノベーション」, 日経ビジネスオンライン, 日経BP社, 2018年7月3日.
<https://business.nikkeibp.co.jp/atcl/report/15/269655/062700068/>, (参照 2019-05-23).
- [9] 「木工工具からレーザ技術を駆使した革新工具へ, 高付加価値工具への限りなき挑戦」, 精密工学会誌, Vol.18, No.10, p.813-816, グラビアとインタビュー, 2018年10月号.
https://www.jstage.jst.go.jp/article/jjspe/84/10/84_813/_pdf/-char/ja, (参照 2019-05-23).
- [10] 「硬脆材料の切削加工技術」, 日刊工業新聞電子版, p.30-32, 日刊工業新聞社, 2018年10月31日.

https://d3ukgu32nhw07o.cloudfront.net/space_pdf/pdf_file5bd85c8193584.pdf?jimt0f2018web=1031, (参照 2019-05-23).

- [11] 平成 30 年度 元気な企業実態調査報告書XII, 静岡県経済産業部, p.25-26, 2019 年 2 月.

11. 公的資金獲得

- [1] 平成 26 年度 戦略的基盤技術高度化支援事業 (サポイン), 経済産業省, 「異種積層材向け PCD (多結晶ダイヤモンド) 微細複合工具成形技術の開発」, 43,744,853 円 (2014 年度), 19,165,940 円 (2015 年度).
<http://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/2014/0728SenryakuKoubou.htm>, (参照 2019-05-23).
- [2] 平成 29 年度 国内事業化可能性調査費補助金, 浜松地域イノベーション推進機構, 「レーザを用いて開発したダイヤモンド工具の市場性調査」, 500,000 円, 2017 年.
- [3] 平成 30 年度補正 ものづくり・商業・サービス経営力向上支援補助金 2 次公募, 経済産業省, 「PCD (多結晶ダイヤモンド) エンドミルを用いた超薄板サファイアを微細加工するための生産体制の構築」, 5,000,000 円, 2018 年.
- [4] 平成 30 年度 光・電子技術活用促進事業費補助金, 浜松地域イノベーション推進機構, 「超短パルスレーザによる工具成形における形状測定精度と生産性の向上」, 2,000,000 円, 2018 年.
- [5] 令和元年 戦略的基盤技術高度化支援事業(サポイン事業), 経済産業省, 「マイクロテクスチャエンドミルの主軸反転傾斜切削による超微粒パウダー製造技術の開発」, 2019 年.
<https://www.chusho.meti.go.jp/keiei/sapoin/2019/190604mono.htm>, (参照 2019-06-04).

12. 成果報告書

- [1] 「異種積層材向け PCD (多結晶ダイヤモンド) 微細複合工具成形技術の開発」, 戦略的基盤事業高度化支援事業 研究開発事例集, 平成 25 年度～平成 26 年度採択事業, 関東経済産業局製造産業化, p.82-83, 2016 年 3 月発行.

13. 受賞歴

- [1] 研究開発功労者, 内山文宏, 「レーザ加工によるダイヤモンド工具の開発」, 2018年3月15日, 川勝平太静岡県知事より表彰状を授与された。
<http://www2.pref.shizuoka.jp/all/kisha17.nsf/c3db48f94231df2e4925714700049a4e/68eff0d92450cf1b4925824e0018d503?OpenDocument>, (参照 2019-05-23).

14. 認定

- [1] 経営革新計画, 「レーザー加工による設計自由度の高いダイヤモンド工具の開発・事業化」, 川勝平太静岡県知事より承認を受けた, 2014年1月21日.
- [2] 中小企業のものづくり基盤技術の高度化に関する法律第4条第1項の規定に基づく特定研究開発等計画, 20140612 関東第95号, 「異種積層材向けPCD(多結晶ダイヤモンド)微細複合工具成形技術の開発」, 安藤久佳関東経済産業局長より認定された, 2014年7月17日.
- [3] 経営力向上計画, 2018 関経向申第 833 号, 後藤収関東経済産業局長より認定された, 2018年3月12日.
- [4] 中小企業のものづくり基盤技術の高度化に関する法律に基づく特定研究開発等計画(第38回), 20180517 関東第56号, 「切りくず排出性を飛躍的に向上させる機能性ストラクチャ付PCD(多結晶ダイヤモンド)工具とその成形方法の開発」, 後藤収関東経済産業局長より認定された, 2018年6月26日。
http://www.kanto.meti.go.jp/seisaku/sapoin/data/20180627nintei_38_besshi1.pdf, (参照 2019-05-23).
- [5] 先端設備導入計画, 磐産産第264号, 渡部修磐田市長より認定された, 2018年8月31日.
- [6] 中小企業のものづくり基盤技術の高度化に関する法律に基づく特定研究開発等計画(第40回), 2019424 関東第58号, 「マイクロテクスチャエンドミルの主軸反転傾斜切削による超微粒パウダー製造技術の開発」, 角野然生関東経済産業局長より認定された, 2019年5月24日.

15. 新事業所創成

[1] 内山刃物 R&D センター, 静岡県磐田市豊岡 6028-2, 2017 年 1 月開所.

以上