

平成 27 年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「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」

研究開発成果等報告書

平成 28 年 3 月

担当局 関東経済産業局
補助事業者 公益財団法人 浜松地域イノベーション推進機構

目 次

第1章 研究開発の概要

1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2	研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	3
1-3	成果概要	5
1-4	当該研究開発の連絡窓口	6

第2章 本論

2-1	超短パルスレーザと機上3次元計測機能を搭載した工具成形機の開発	7
2-2	PCD微細複合工具の成形技術開発	8
2-3	異種積層材用切削工具の開発	13

第3章 全体総括

全体総括	21
------	----

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1 研究開発の背景

太陽光発電における消費者庁の事故情報集計では『火災』が全体の30%で最多となっている。この要因としてカバーガラスからの雨水の浸入による異常加熱が一因と考えられており、耐久性向上が課題となっている。この課題を解決すべく開発された新素材（ガラス樹脂積層材）は、その耐貫通性（耐衝撃性）の高さと軽量性が注目を集めている。しかし、その一方で、硬脆材料であるガラスと熱変形の生じやすい樹脂では加工特性が全く異なることから、同時加工が困難であり、材料の普及には高効率な加工方法の確立が課題である。ガラスの耐久性向上には化学強化を改良する試みも見られるが、軽量化のために薄板化の要求もあり、性能向上には限界がある。

1-1-2 研究開発の目的

本研究開発の目的は、超短パルスレーザを用いた工具成形機の開発と、レーザ照射条件・走査条件の最適化により、PCDに対する微細形状の加工技術を向上させ、PCD微細複合工具の成形技術を確立することである。その技術を適用して、ガラス樹脂積層材、高硬度樹脂積層材およびCFRP樹脂積層材用の工具開発へ展開する。

1-1-3 研究開発の目標

本研究開発の目標は以下の3点である。

- ①超短パルスレーザと機上3次元計測機能を搭載した工具成形機を開発する（装置開発）
- ②PCD微細複合工具の成形技術を開発する（成形技術開発）
- ③異種積層材用切削工具を開発する（工具開発）

以下の3点のターゲット材料に対する工具を開発する。

- ・ガラスと樹脂の積層材
- ・高硬度樹脂と軟質樹脂の積層材
- ・CFRPと樹脂の積層材

1-2 研究体制（研究組織・管理体制，研究者氏名，協力者）

1-2-1 研究組織・管理体制

本研究開発事業は、図1のように1民間企業、2大学、1公設試験研究機関の4機関からなる研究等実施機関と、事業管理機関により構成されている。関東経済産業局から、戦略的基盤技術高度化支援事業に対する補助金の交付決定を受けた補助事業者（事業管理機関）である公益財団法人浜松地域イノベーション推進機構が、実際の研究開発に携わる間接補助事業者の株式会社内山刃物、学校法人光産業創成大学院大学、学校法人東京電機大学、静岡県工業技術研究所 浜松工業技術支援センターを管理し、全体の事業を推進した。研究全体

を総括的に管理するプロジェクトリーダー（PL）とそのフォローをするサブプロジェクトリーダー（SL）を設け、アドバイザーを含めた全体で行う研究開発推進委員会と、効率的に事業を進めるため研究実務者会議を開催した。

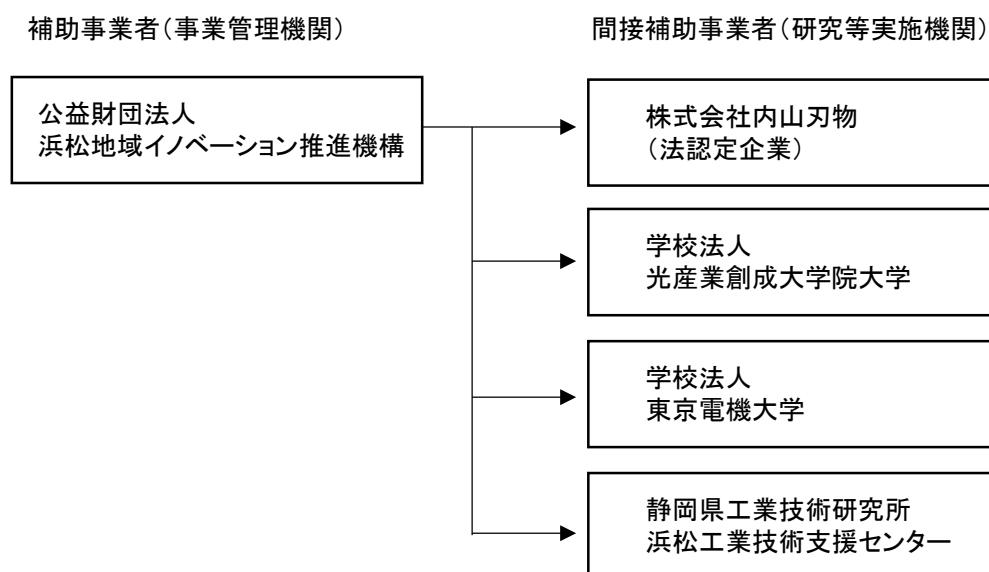


図1 管理体制

1-2-2 研究者氏名

株式会社内山刃物

氏名	所属・役職
内山 文宏	代表取締役 統括研究代表者（PL）
伊藤 明彦	工場長
瀬崎 朗男	ダイヤモンドグループ

学校法人光産業創成大学院大学

氏名	所属・役職
坪井 昭彦	光加工・プロセス分野 教授 副統括研究代表者（SL）
楠本 利行	学校法人光産業創成大学院大学 助教

学校法人東京電機大学

氏名	所属・役職
松村 隆	工学部 教授

氏名	所属・役職
山下 清	光科 上席研究員
植松 俊明	材料科 上席研究員
是永 宗祐	材料科 研究員

1-2-3 協力者（アドバイザー）

氏名	所属・役職
西村 直樹	日本電気硝子株式会社 ディスプレイ事業部 次世代開発部 課長
細川 勲	昭和電工株式会社 石油化学事業部 マネージャー
鈴木 憲太	千代達電子製造（蘇州）有限公司 製造部 生産技術課 副課長

1-3 成果概要

1-3-1 超短パルスレーザと機上 3 次元計測機能を搭載した工具成形機の開発

PCD に対するガラス刃成形と樹脂刃成形を可能とするレーザ波長・パルス幅を特定した。特定したレーザの発振器を搭載し、機構系 4 軸・光学系 4 軸・測定系 2 軸の合計 10 軸を有する工具成形機を開発した。

1-3-2 PCD 微細複合工具の成形技術開発

PCD 微細複合工具の成形技術開発では、工具形状を成形するためのレーザ照射方法の確立が技術的課題である。これを解決するために、PCD に対する超短パルスレーザの加工特性を解明したうえで、照射条件の最適化を行った。見出した照射条件により工具を試作・切削試験・評価することでレーザ照射方法の検証を行った。

1-3-2-1 レーザ照射条件・走査条件の最適化

PCD に対する IR ピコ秒レーザと UV ピコ秒レーザの照射条件の最適化を行った。その結果をもとに、刃数 40 枚刃以上の多数枚刃の成形に成功した。

1-3-2-2 ガラス用切れ刃の成形技術

1-3-2-1 の照射条件により IR ピコ秒レーザを用いて 24 枚刃のガラス用工具を試作した。回転数 6 万 min^{-1} の切削試験における力の測定し、目標であるガラス刃の振れ $0.5\mu\text{m}$ 以下を実現した。

1-3-2-3 樹脂用切れ刃の成形技術

1-3-2-1 の照射条件により UV ピコ秒レーザを用いて 1 枚刃の樹脂用工具を試作した。刃先丸みを評価したところ目標である $1.5\mu\text{m}$ を上回る $1\mu\text{m}$ 以下を実現した。

1-3-3 異種積層材用切削工具の開発

異種積層材用切削工具の開発では、物理的特長が逆の物質を貼り合せた材料を同時に切削するためには各層毎に適した形状を 1 本の工具に成形する微細成形技術の確立と工具形状の最適化が課題である。これを解決するためにレーザ工具成形機を用いて異種積層材用 PCD 工具を設計・試作・切削試験・評価を繰り返した。

1-3-3-1 ガラスと樹脂の積層材

1-3-2-2 と 1-3-2-3 を 1 本の工具に成形することにより、ガラスと樹脂の同時加工を可能とする工具を開発した。送り速度 100mm/分においてガラスカケ量 10 μ m 以下、樹脂の溶けなしを実現した。

1-3-3-2 高硬度樹脂と軟質樹脂の積層材

1-3-2-2 を応用することにより、高硬度樹脂とフィルムの同時加工を可能とする工具を開発した。

1-3-3-3 CFRP と樹脂の積層材

1-3-2-2 を応用することにより、CFRP と樹脂の同時加工を可能とする工具を開発した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人 浜松地域イノベーション推進機構

事業推進部 米谷 俊一

〒432-8036 静岡県浜松市中区東伊場二丁目 7 番 1 号

浜松商工会議所会館 8 階

TEL:053-489-8111 FAX:053-450-2100

E-mail: kometani@hai.or.jp

第2章 本論

2-1 超短パルスレーザーと機上3次元計測機能を搭載した工具成形機の開発

異種積層材用工具 PCD 工具を開発するために、超短パルスレーザーと機上3次元計測機能を搭載した工具成形機を開発した。

まず PCD に対するガラス刃成形と樹脂刃成形を可能とするレーザー波長・パルス幅を特定した。各種レーザー発振器を用いて実際にガラス刃成形と樹脂刃成形を試した。光産業創成大学院大学、浜松工業技術支援センター、レーザージョブショップ、レーザー発振器メーカー、レーザー加工機メーカー等の発振器によりレーザー照射実験を行った。表1はその結果をまとめたものである。本実験は2011年11月より逐次行われたものである。評価方法としてガラス刃は照射部の面粗さ・形状精度・成形効率等、樹脂刃は刃先のチップング量・成形効率等により総合的に評価した。その結果、ピコ秒の超短パルスレーザーが最適との結論に至った。

次に特定した波長を有するレーザー発振器を搭載し、図2のようなシステムの基本設計を光産業創成大学院大学にて行った。機構系4軸・光学系4軸・測定系2軸の合計10軸を有する図3のような工具成形機を開発した。

表1 各種レーザー波長・パルス幅と刃形成形の適応性

パルス幅	用途	UV (355nm)	GREEN (532nm)	IR (1064nm)	CO2 (10.6 μ m)
マイクロ秒	ガラス刃	—	—	—	×
	樹脂刃	—	—	—	×
ナノ秒	ガラス刃	△	○	×	—
	樹脂刃	×	×	×	—
ピコ秒	ガラス刃	△	○	○	—
	樹脂刃	○	×	×	—

○：用途に必要な刃先を成形できる

△：用途に必要な刃先を成形できるが時間が掛かる

×：用途に必要な刃先を成形できない

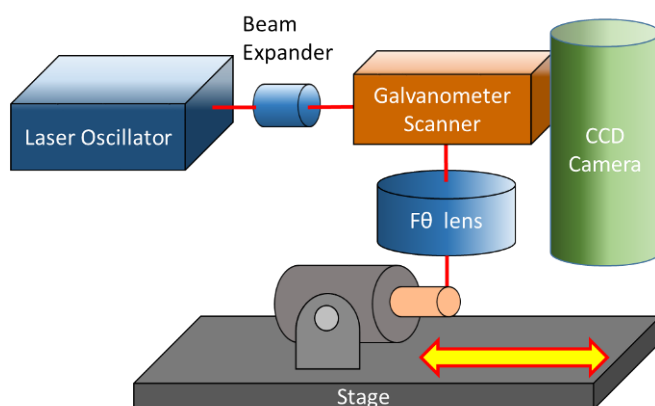


図2 開発したレーザー工具成形機のシステム図



図3 開発したレーザ工具成形機

2-2 PCD 微細複合工具の成形技術開発

2-2-1 レーザ照射条件・走査条件の最適化

まず、浜松工業技術支援センターにて PCD の反射率の波長依存性を測定し、波長による吸収特性を検証した。表2に示す各種 PCD 材料（ダイヤモンド粒径 $0.5\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 、 $25\mu\text{m}$ ）に対する $200\sim 1200\text{nm}$ 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）の結果が図4である。これより、PCD の反射率は $300\sim 1200\text{nm}$ 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。

表2 PCD 材料の種類と粒径

粒径	グレード	メーカー
$0.5\mu\text{m}$	DA2200	住友電工
$2\mu\text{m}$	CTB002	エレメント シックス
$8\mu\text{m}$	HM80 H80	トーメイダイ ヤモンド
$25\mu\text{m}$	CTB302	エレメント シックス

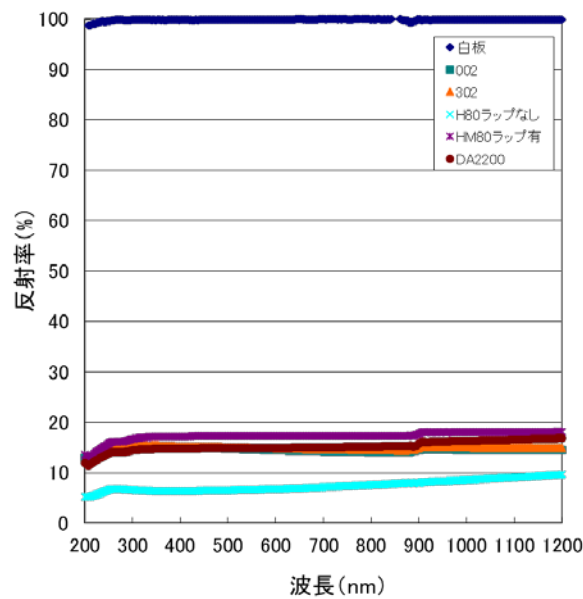


図4 波長と反射率の関係

次に浜松工業技術支援センターと共にレーザー照射条件の最適化を行った。図5は IR ピコ秒レーザを PCD に照射した時のフルエンスと除去効率の関係を表したものである。これより、走査速度によらずフルエンス $1.5\text{J}/\text{cm}^2$ の時、除去効率が最大となることが分かった。さらにフルエンス $1.5\text{ J}/\text{cm}^2$ における走査速度と表面粗さの関係を表したものが図6である。これより、走査速度 $400\text{mm}/\text{s}$ の時が最も表面粗さが良いことが分かった。

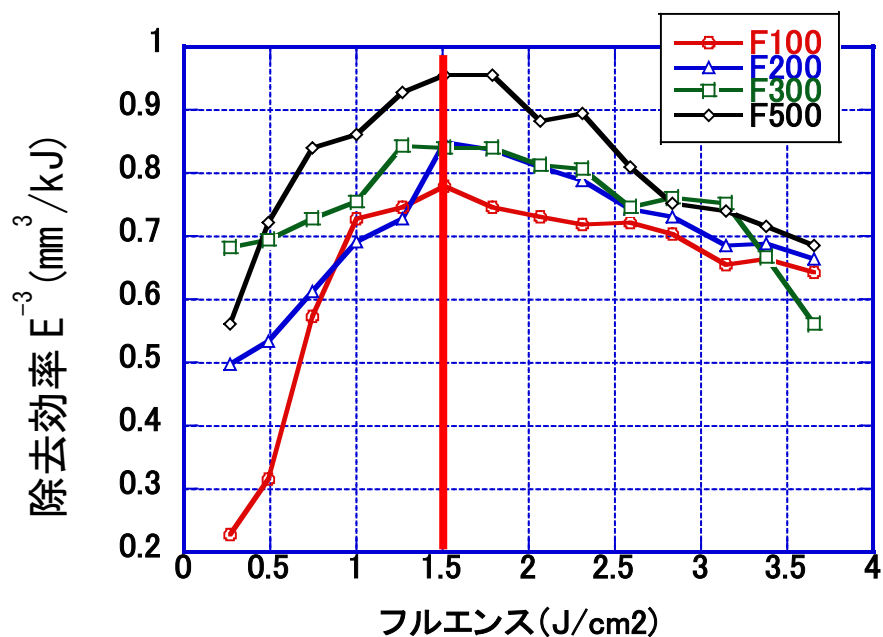


図5 IR ピコ秒レーザにおけるフルエンスと除去効率の関係

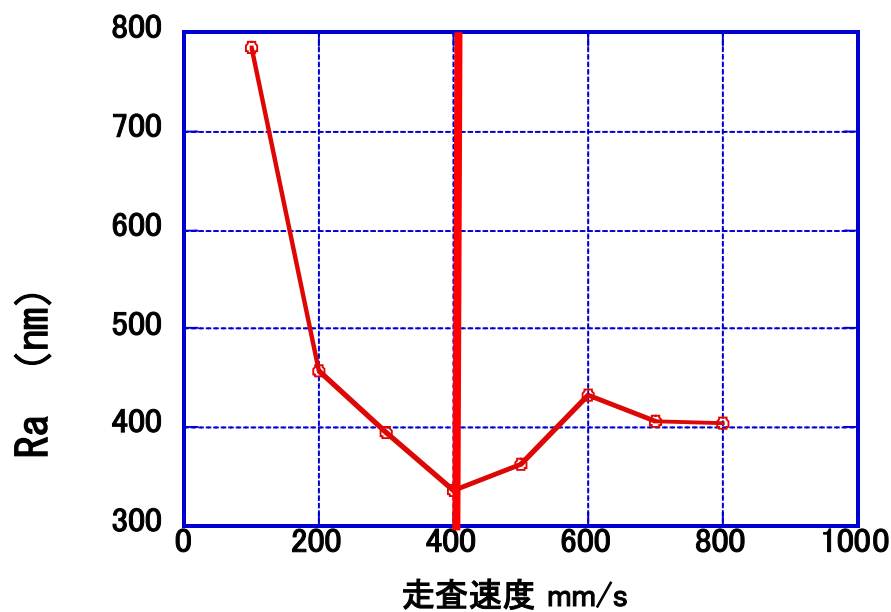


図6 IR ピコ秒レーザにおける走査速度と表面粗さの関係

次に最適化したレーザ照射条件により、PCD 工具刃先を成形し、その刃先エッジ性を従来技術と比較した。図7は放電加工，砥石研削の従来技術と最適化したレーザを比較したものである。従来技術に比べエッジ性が高いことを確認した。さらには粗粒径 PCD のエッジ性と微粒系 PCD のエッジ性が変わらないことも分かった。

従来工具成形技術		開発したレーザ機	
放電加工	砥石研削(#2000)	微粒系PCD	粗粒系PCD

図7 従来技術と開発したレーザ工具成形機によるPCD エッジ性の比較

2-2-2 ガラス用切れ刃の成形技術

開発したレーザ工具成形機を用いてガラス刃成形における多数枚刃化と振れ精度の向上を試みた。まず図8のような24枚刃を成形し、各刃の高さのばらつきである振れを測定した結果、図9となり、目標値である振れ精度 $0.5\mu\text{m}$ 以下を実現した。本切削試験は東京電機大学と共に行った。次にガラス刃のより多数枚刃化に取組み、図10のような60枚刃の成形に成功した。

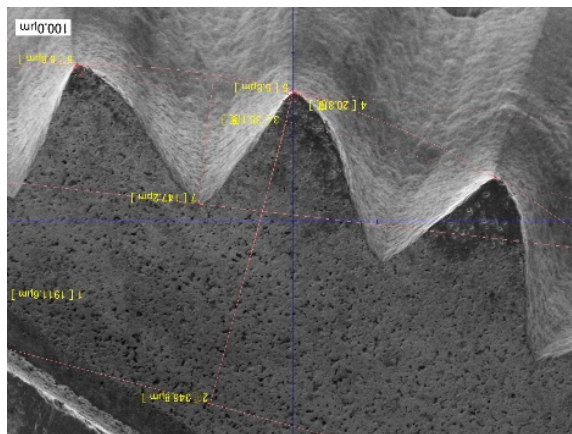
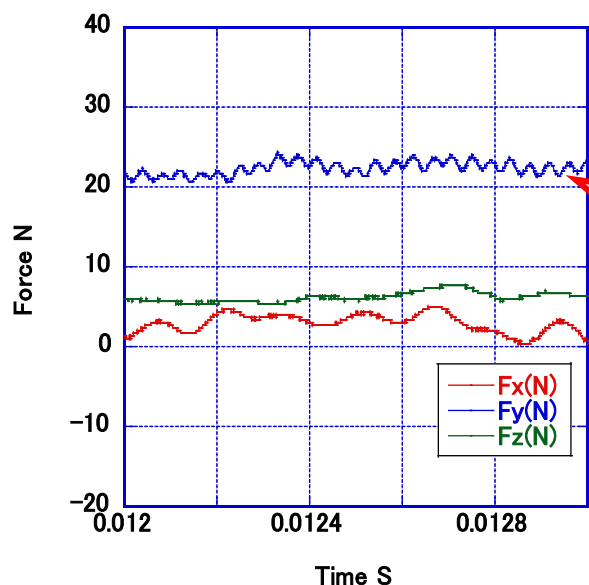


図8 試作したガラス刃24枚刃PCD工具

切削条件	
回転数 $S(\text{min}^{-1})$	60000
工具径 $D(\text{mm})$	2
切削速度 $V_c(\text{m/min})$	377
送り速度 $F(\text{mm/min})$	288
刃数 $Z(\text{枚})$	24
$F_t(\mu\text{m/tooth})$	0.2



工具1回転中に24個の力のピークがあり、全24刃が当たっている→振れ $0.5\mu\text{m}$ 以下を実現

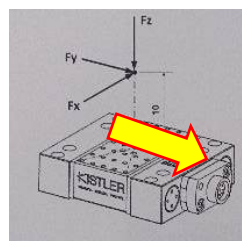


図9 24枚刃PCD工具による切削力測定結果(左)と切削方向(右)

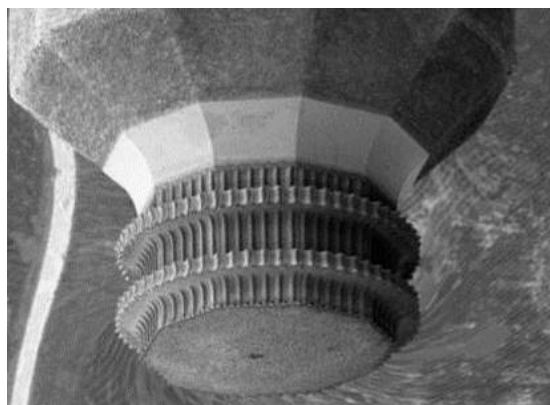


図10 試作したガラス刃 60 枚刃 PCD 工具

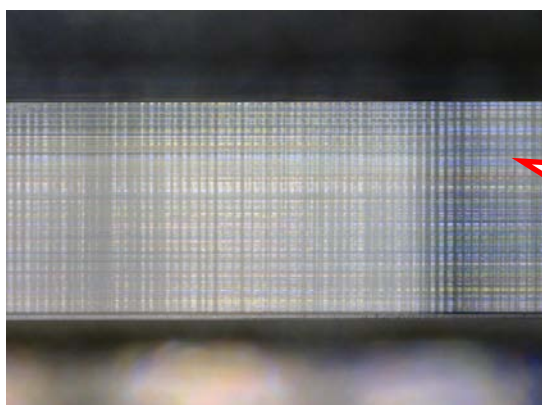
2-2-3 樹脂用切れ刃の成形技術

開発したレーザ工具成形機を用いて樹脂用工具の刃先の鋭利化を図った。レーザの照射条件を最適化することにより図11のように目標である刃先丸み $1\mu\text{m}$ 以下を実現した。さらに、工具を試作し、切削試験を行ったところ図12のような良好な切削面が得られることを確認した。



PCD 粒径 $10\mu\text{m}$ よりも
もシャープなエッジ
(刃先丸み $1\mu\text{m}$ 以下)
を実現

図11 レーザ照射条件の最適化により鋭利化した PCD 工具の刃先



透明度のある
良好な切削面

図12 アクリル切削面

切削条件	
回転数 $S(\text{min}^{-1})$	10000
工具径 $D(\text{mm})$	6
切削速度 $V_c(\text{m/min})$	188
送り速度 $F(\text{mm/min})$	800
刃数 $Z(\text{枚})$	1
$F_t(\mu\text{m/tooth})$	80.0

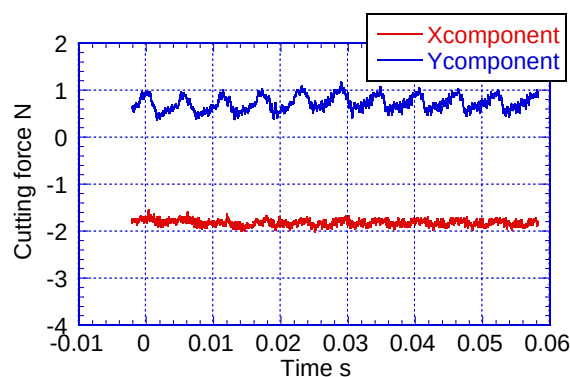
2-3 異種積層材用切削工具の開発

2-3-1 ガラスと樹脂の積層材

ターゲット材料は図13のようなガラスと樹脂の積層材である。開発したレーザ工具成形機を用いてガラス樹脂積層材用工具を開発した。課題はガラス切削条件下における樹脂の溶け対策とガラスのカケ対策であった。樹脂の溶け対策は図16のように切りくず排出溝を設け、品質工学を用いて形状の最適化を行った。また、ガラスのカケ対策はまず最大 300 枚刃まで試作し、切削試験を行った結果、20 枚刃以上では切りくずの詰まりが発生し、不適を分かった。次に切削シミュレーションを用いて 20 枚刃以下の切削力を計算した結果、図14における力の振動成分が小さいことを判断基準として 11 枚刃あるいは 13 枚刃が適当と判断した。さらには実際に 10, 11, 12, 13 枚刃を試作し切削試験を行った結果、図15のように 11 枚刃がガラスカケ量最小になることを確認した。開発した工具は図16のようにレーザにより成形した PCD 工具である。この工具により図17, 18のように開発目標である切削面のガラスカケ量 $10\mu\text{m}$ 以下、樹脂の溶け無きことを確認した。さらには川下企業が実施した切削面評価試験において目標値であるガラスカケ量 $10\mu\text{m}$ 以下をクリアした。



図13 ターゲット材料（ガラス樹脂積層材）



10 edges

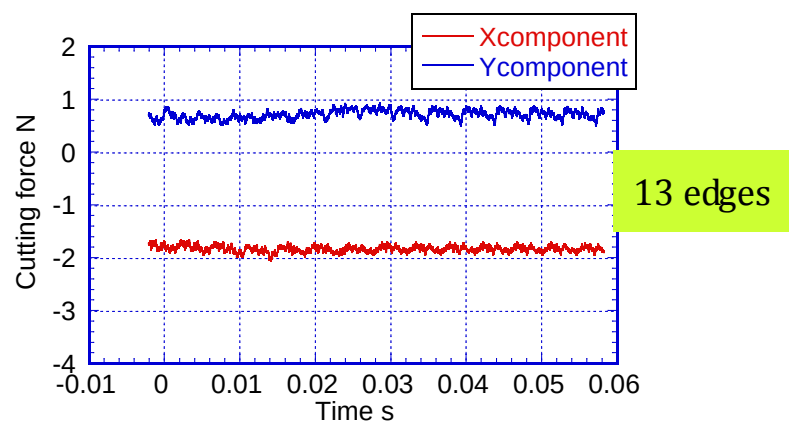
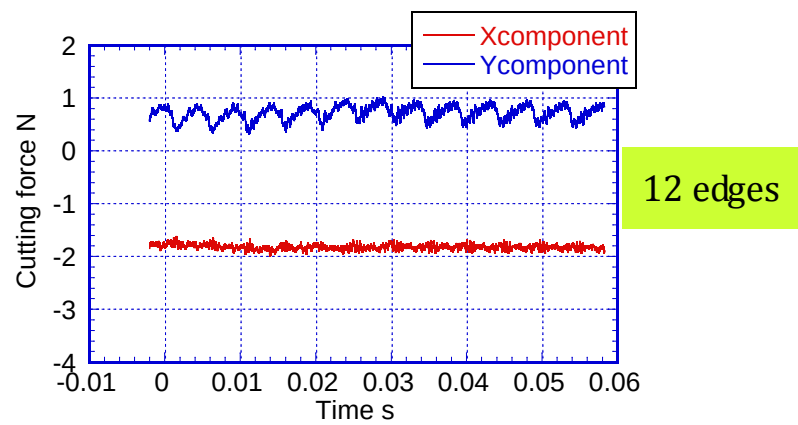
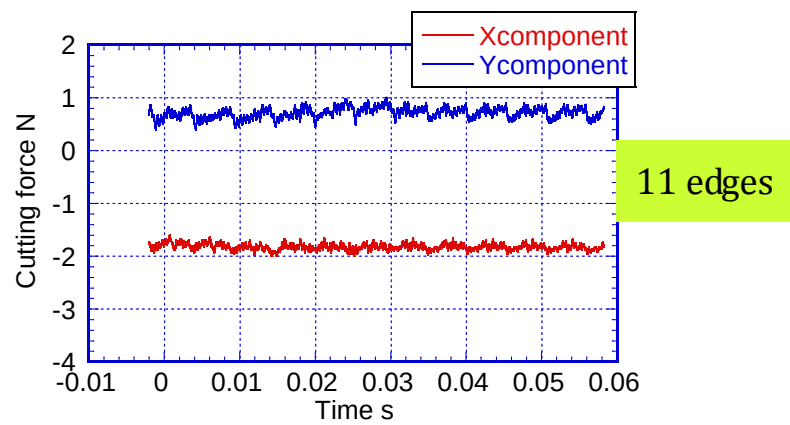


図14 10枚刃から13枚刃の切削シミュレーション結果

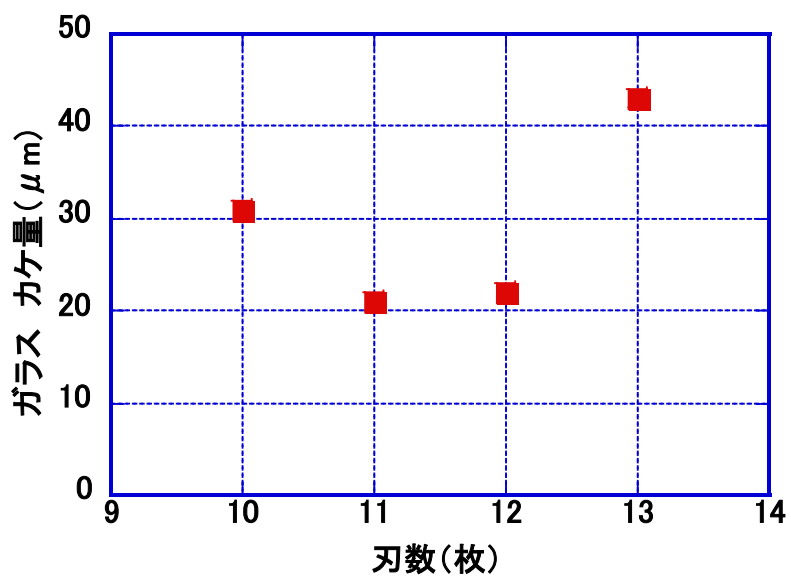


図15 刃数とガラスカケ量の関係

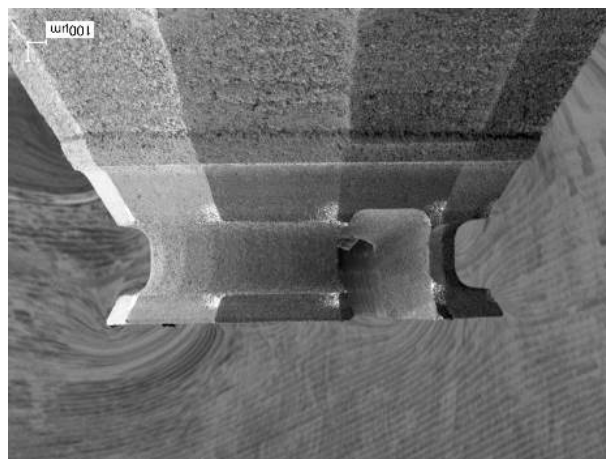


図16 開発したガラス樹脂積層材用PCD工具

切削条件	
回転数 $S(\text{min}^{-1})$	60000
工具径 $D(\text{mm})$	2
切削速度 $V_c(\text{m/min})$	377
送り速度 $F(\text{mm/min})$	100
刃数 $Z(\text{枚})$	10
$F_t(\mu\text{m/tooth})$	0.17

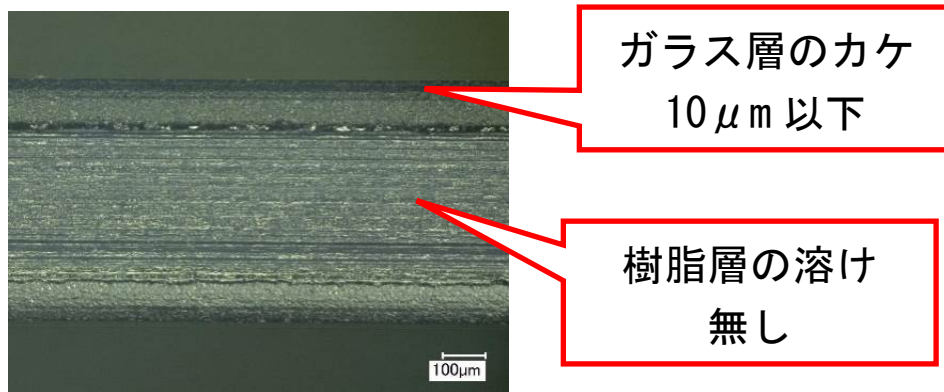


図 1 7 開発工具によるガラス樹脂高硬度樹脂の切削面の断面

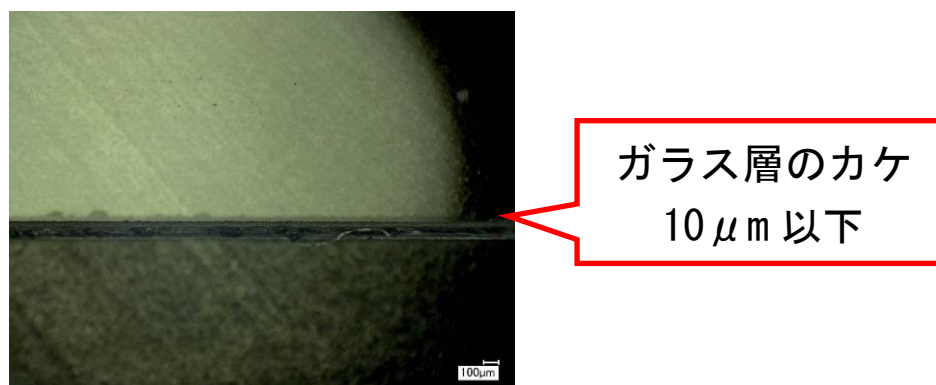


図 1 8 開発工具によるガラス樹脂高硬度樹脂の切削面の上面

2-3-2 高硬度樹脂と軟質樹脂の積層材

開発したレーザ工具成形機を用いて高硬度樹脂と軟質樹脂の同時切削工具を開発した。ターゲット材料は図 1 9 のような高硬度樹脂と軟質樹脂の積層材である。開発した工具は図 2 0 のようなレーザによりすくい面に傾斜溝を設けた PCD 工具である。この工具により図 2 1, 2 2 のように開発目標である切削面の高硬度樹脂部のえぐれ、軟質樹脂部の溶け無きことを確認した。折り曲げ試験を行い、割れが発生した時の力を測定した結果、図 2 3, 2 4 のように傾斜溝無しは 11N で、傾斜溝有りは 26N となり、屈曲性の向上を確認した。さらには川下企業が実施した屈曲試験において目標値である ϕ 25mm 以下をクリアした。

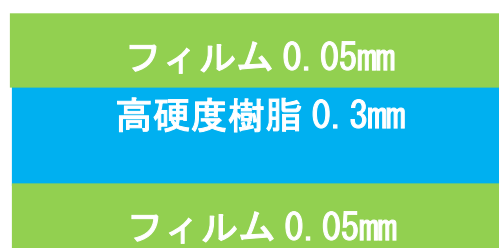


図 1 9 ターゲット材料（高硬度樹脂と軟質樹脂の積層材）

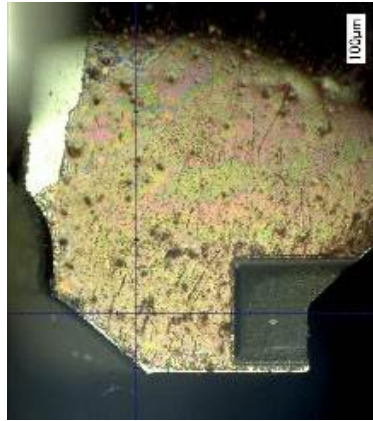


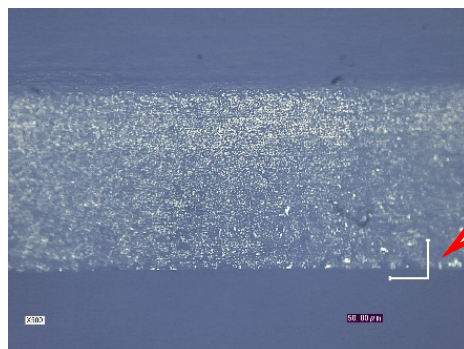
図20 開発した高硬度樹脂と軟質樹脂の積層材用 PCD 工具

切削条件	
回転数 $S(\text{min}^{-1})$	35000
工具径 $D(\text{mm})$	1.5
切削速度 $V_c(\text{m/min})$	165
送り速度 $F(\text{mm/min})$	350
刃数 $Z(\text{枚})$	1
$F_t(\mu\text{m/tooth})$	10.0



えぐれ大きい
= 屈曲性低い

図21 傾斜溝無しの高硬度樹脂と軟質樹脂の積層材切削面



えぐれ小さい
= 屈曲性高い

図22 傾斜溝有り（右）の高硬度樹脂と軟質樹脂の積層材切削面

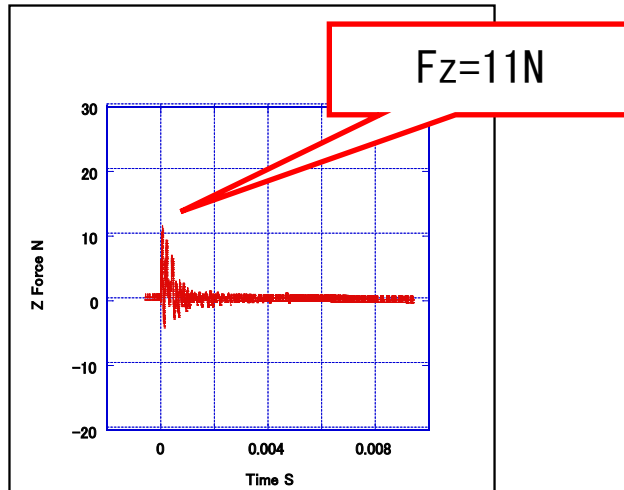


図 2-3 傾斜溝無し of 折り曲げ試験結果

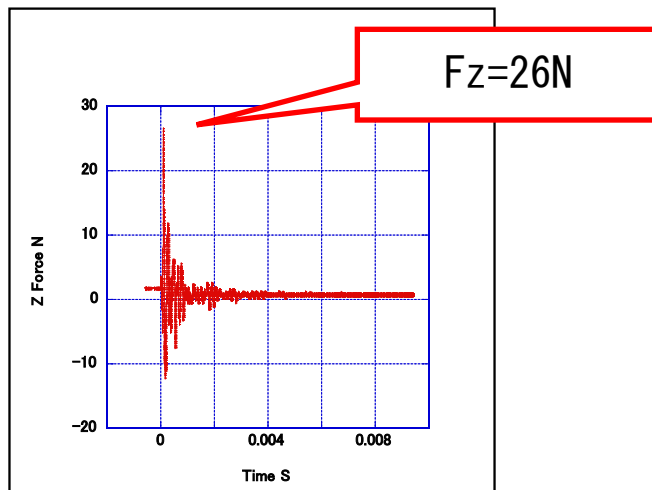


図 2-4 傾斜溝有りの折り曲げ試験結果

2-3-3 CFRP と樹脂の積層材

開発したレーザ工具成形機を用いて CFRP と樹脂の同時切削工具を開発した。ターゲット材料は図 2-5 のような CFRP と樹脂の積層材である。開発した工具は図 2-6 のようなレーザによりすくい面にチップブレーカを施した PCD 工具である。この工具により図 2-7, 2-8, 2-9, 3-0 のように開発目標である送り速度 1200mm/分において CFRP 層表面のカケ $10\mu\text{m}$ 以下、樹脂層の溶け無きことをクリアした。

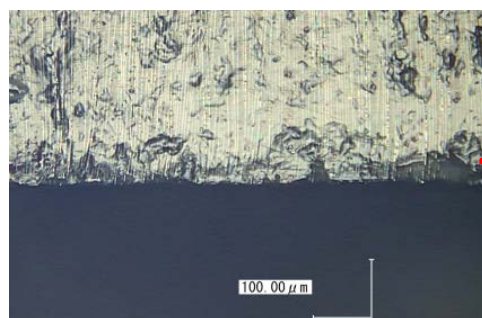


図 2-5 ターゲット材料 (CFRP 樹脂積層材)



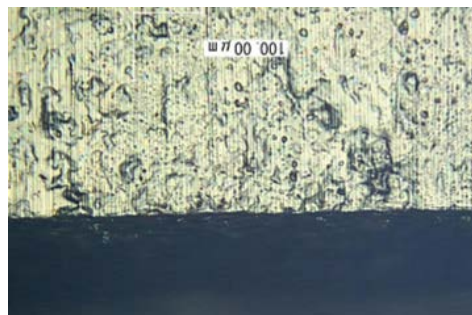
図26 開発した CFRP 樹脂積層材用 PCD 工具

回転数 $S(\text{min}^{-1})$	18000
工具径 $D(\text{mm})$	2
切削速度 $V_c(\text{m/min})$	113
送り速度 $F(\text{mm/min})$	1200
刃数 $Z(\text{枚})$	2
$F_t(\mu\text{m/tooth})$	33.3



カケ約 $50\mu\text{m}$

図27 チップブレイカ無しの CFRP 切削上面



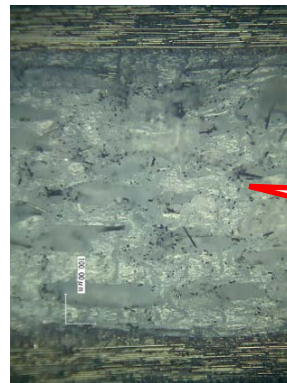
カケ $10\mu\text{m}$ 以下

図28 チップブレイカ有り CFRP 切削上面



樹脂の溶け有り

図29 チップブレイカ無しの樹脂層切削面



樹脂の溶けなし

図30 チップブレイカ有りの樹脂層切削面

第3章 全体総括

本研究開発の成果をまとめると下記6点である。

- ①超短パルスレーザを搭載した工具成形機を開発した。
- ②レーザ照射の最適化により、PCD 工具成形において従来技術よりも良好なシャープエッジを実現した。
- ③PCD 工具の多数枚刃の成形に成功し、かつ高い振れ精度を実現した。
- ④レーザ工具成形機によりガラスと樹脂を同時に切削できる PCD 工具を開発した。
- ⑤レーザ工具成形機により高硬度樹脂と軟質樹脂を同時に切削できる PCD 工具を開発した。
- ⑥レーザ工具成形機により CFRP と樹脂を同時に切削できる PCD 工具を開発した。

今後の研究開発の課題は、ガラス樹脂積層材用工具は次の段階として、量産に向けた取り組みである。量産時にはワーク材にさらに保護フィルムが貼られるため、保護フィルムまで同時に切削できることが求められている。ガラスと樹脂とフィルムの同時切削に対応した工具開発を進めて行く。

今後の事業展開として、複数回の展示会出展、学会や専門委員会での成果発表、ホームページの更新を行う予定である。さらには大学、公設試、材料メーカー、機械メーカーとの共同研究を進め、研究開発型企业への展開を図ることにより、ものづくりの土台を担う企業となる決意である。