

平成27年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高機能多結晶ダイヤモンド工具の高生産性・低コスト化技術を支援するための、大型焼結体製造技術と工具形状成型技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成28年3月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人栃木県産業振興センター

目 次

第1章 研究開発の概要

1.1 概 要	1
1.2 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1.3 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	3
1.4 成果概要	6
1.5 当該研究開発の連絡窓口	6

第2章 本 論

2.1 従来の技術	7
2.2 新技術「高機能多結晶ダイヤモンド工具の高生産性・低コスト化技術を支援するための、大型焼結体製造技術と工具形状成型技術の開発」	9
2.3 課 題	
2.3.1 [課題 1] PCD サイズ課題への対応	9
2.3.2 [課題 2] PCD 加工性課題への対応	10
2.3.3 [課題 3] PCD 工具の放電加工成型課題への対応	10
2.4 実施内容	
2.4.1 大型ダイヤモンド焼結体製造技術の確立	11
2.4.2 加工性の向上と大気圧プラズマを利用した新加工技術の確立	12
2.4.3 大型ダイヤモンド焼結体の工具化のためのシミュレーション技術及び工具評価	14

第3章 全体総括

3.1 3年間の研究開発成果と考察	19
3.2 今後の課題と事業化展開	19

第1章 研究開発の概要

1.1 概要

軽量化による低燃費を目的とした、航空機および自動車部品のCFRP（炭素繊維強化熱硬化性プラスチック）化において、その難削性から、加工に適した工具の開発が常に望まれており、今なお未解決な技術課題として存在している。CFRP加工工具用素材としては、ダイヤモンド焼結体（PCD）が最適と考えられているが、その難加工性、サイズ制限という課題が有る。そこで「高機能多結晶ダイヤモンド工具の高生産性・低コスト化技術を支援するための、大型焼結体製造技術と工具形状成型技術の開発」を行う。（図1.1.1）

現在、CFRPの加工に使用されている工具は、超硬（WC-Co）もしくは気相合成によるダイヤモンドコーティングがなされた物である。超硬工具は摩耗が早く短寿命であり、コーティング工具においては①再研磨が出来ない、②コーティングの厚さ分丸くなり鋭利な刃先が形成されない、③最適化されなければ剥離する等の問題点が存在している。一方で、ダイヤモンドの粉を高温高圧で焼き固め、ダイヤモンド同等の性能を持たせたダイヤモンド焼結体（PCD）はCFRP加工用工具の素材として最適と考えられる。

しかしながら、現在市販されているPCDは殆どがダイヤモンド層0.5mm程度の非常に薄く、工具設計上、超硬との複合構造となり多くの問題点を有している。従って、ダイヤモンド層の厚いPCDを開発することで上記問題点が解消されると考えられている。

本研究では、高い熱伝導性と耐摩耗性のある多結晶ダイヤモンド焼結体（PCD）の大型化を実現するとともに、加工性についても改善を行うことで、川下企業のニーズに即したデザインの工具製造と耐摩耗性に優れ、再研磨による工具の再生が可能でコスト性に優れた切削工具を実現するために、素材製造技術と工具形状成型技術について基盤技術の高度化を図る。

1.2 研究開発の背景・研究目的及び目標

近年、エネルギー起源温室効果ガスの排出抑制、輸送コストの低減を目的とした、輸送機器の軽量化に対応する為に、CFRP（炭素繊維強化熱硬化性プラスチック）の構造体への応用が多

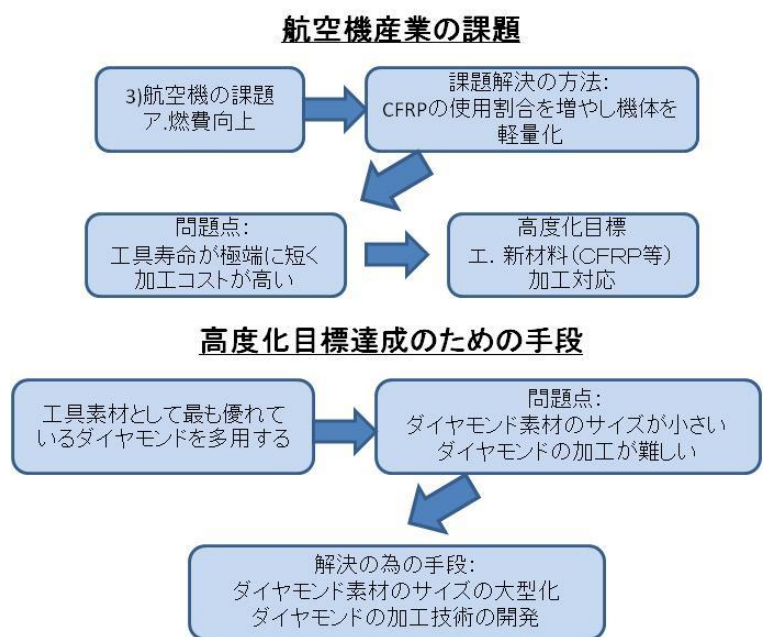


図 1.1.1 従来技術と新技術の比較

方面で検討されている。CFRP は 1970 年代のスポーツ用品や航空機の 2 次構造材へ採用された導入期に始まり、80 年代の成長期、90 年代の拡大期を経て、2004 年頃のエアバス A380、ボーイング 787 の 1 次構造材への採用を皮切りに本格的な拡大期に突入した。問題となっていた材料の安定供給、高い成型加工コスト、低いスループット、複合材化は大きく改善されてきている。しかしながら、成型後の切削加工、例えば、孔加工、外周加工などの組上げに不可欠な加工技術は未だ確立されていない。その為、CFRP へのニーズの高まりと共に加工技術の向上、特に CFRP 加工に最適な工具の開発が望まれている。工具素材としては耐摩耗性・耐溶着性等を考慮し、ダイヤモンドが最適と考えられている。しかしながら、ダイヤモンド素材のサイズが限定され、その加工方法も非常に困難であり、精度が不十分で有る。こうした状況下、素材サイズの拡大、加工性の良いダイヤモンド焼結体を供給し最適な加工方法を確立する事で、これら課題を解決していく。(図 1.2.1) 現在、CFRP の加工に使用されている工具は、超硬 (WC-Co) もしくは気相合成によるダイヤモンドがコーティングされた物である。超硬工具は摩耗が早く短寿命で有り、コーティング工具は再研磨が出来ない、刃先がコーティングの厚さ分丸くなり鋭利な刃先が形成されない、最適化されなければ剥離する等の問題点が存在している。一方で、ダイヤモンドの粉を高温高圧で焼き固め、ダイヤモンド同等の性能を持たせたダイヤモンド焼結体 (PCD) は CFRP 加工用工具の素材として最適と考えられる。しかしながら、現在市販されている PCD は殆どがダイヤモンド層 0.5mm 程度の非常に薄い物で有る為に、工具設計上、超硬との複合構造となり多くの問題点を有している。この問題点を解決する為に 「課題 1 : PCD サイズ課題 (ダイヤモンド層厚み不足)」を設定し、直径 50mm、厚み 10mm の PCD を、焼結条件及びバインダーや造粒方法を見直す事で開発を実施する。(H27 事業完了時) さらに、大型のダイヤモンド焼結体導入において新たに発生する課題として、「課題 2 : PCD 加工性課題 (工具形状加工が困難)」、「課題 3 : 放電加工課題 (放電ダメージ層の存在)」を設定、各課題を研究・開発する事で優れた工具素材を提供する体制を整え、CFRP 加工に対する最適な工具が供給される環境を構築する事で、高度化目標「新材料 (CFRP 等) 加工対応」を解決していく。

そこで、平成 25 年度～27 年度、戦略的基盤技術高度化支援事業において、PCD の大型化を実現し、工具成型についても改善を行う事で、現場ニーズに則したデザインの工具製造と、耐摩耗性に優れ、再研磨による再生が可能なコスト性に優れた切削工具を実現すべく、素材製造技術と工具形状成型技術について、図 1.2.2 の流れの元、川下企業のニーズに即した技術の高度化を図った。

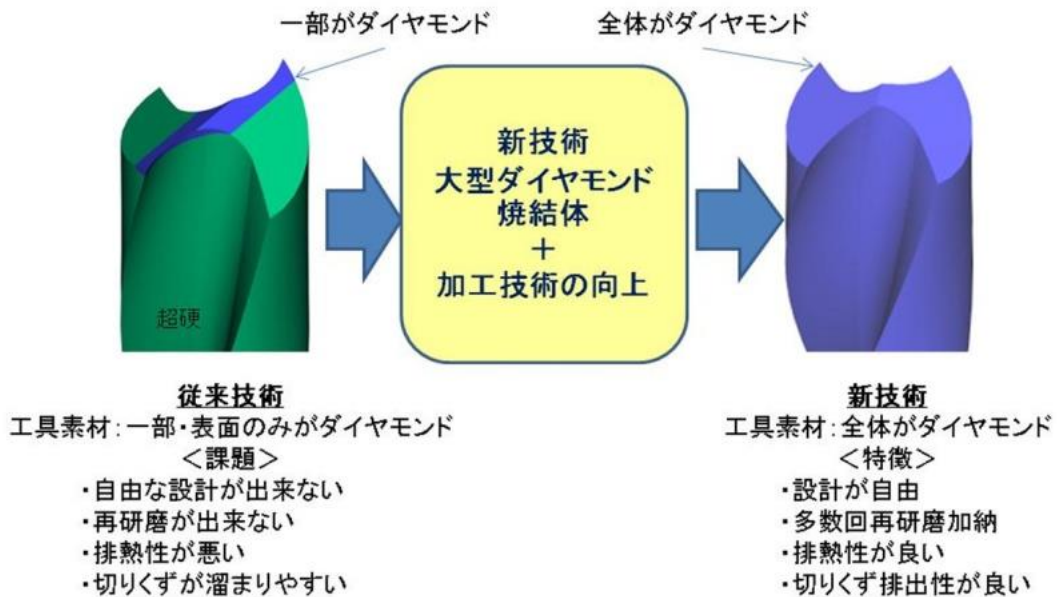


図 1.2.1 従来技術と目標とする新技術の比較

基盤技術の高度化方針

●航空機材料の切削加工に対する川下企業のニーズ

- ◆川下企業①(航空機部品製造):航空機部品の穴あけ品質、ドリル寿命、工具コストに対する技術革新。画期的な切削工具
- ◆川下企業②(工具メーカー):成形加工しやすいPCD素材、製造コスト技術

PCDの焼結と工具形状への成形技術の基板技術の高度化

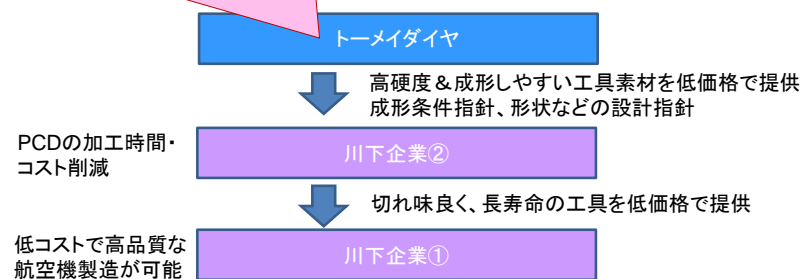


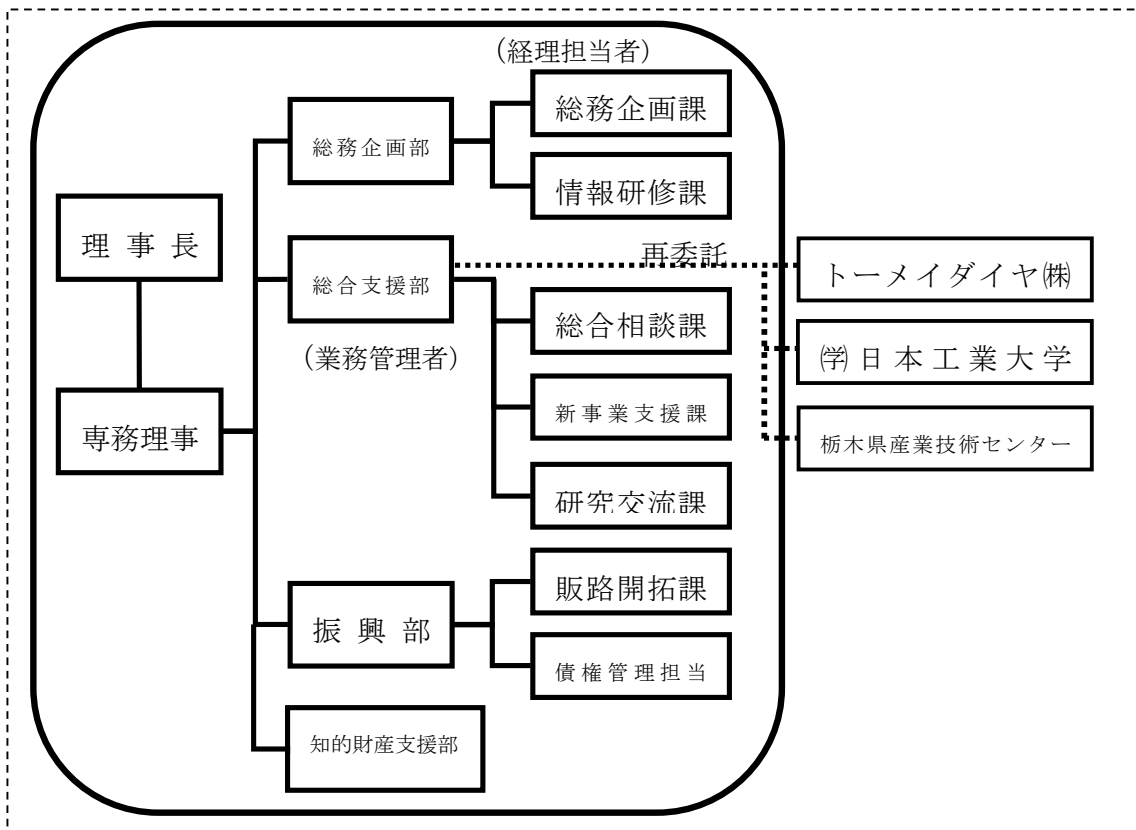
図 1.2.2 基板技術の高度化

1.3 研究体制 (管理体制・研究組織、研究者氏名)

<プロジェクトの管理・運営>

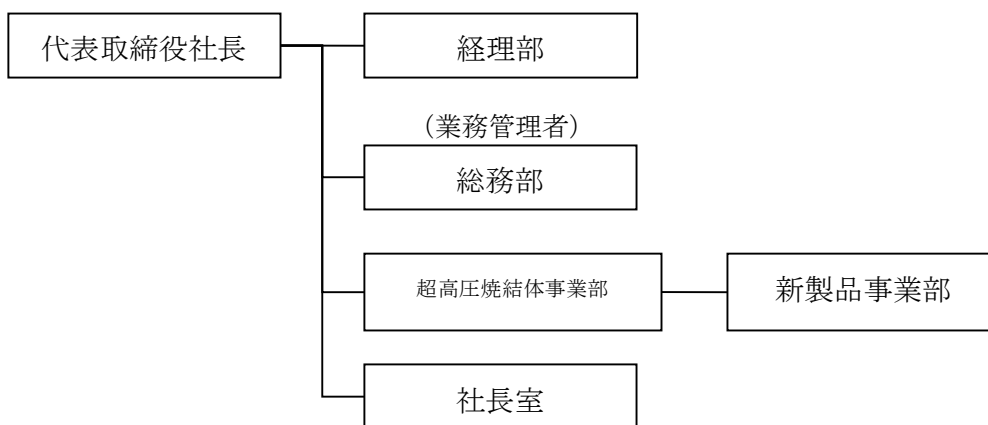
事業管理機関 : 公益財団法人栃木県産業振興センター

所在地 : 〒321-3226 栃木県宇都宮市ゆいの杜1丁目5番40号



<プロジェクトの研究実施者>

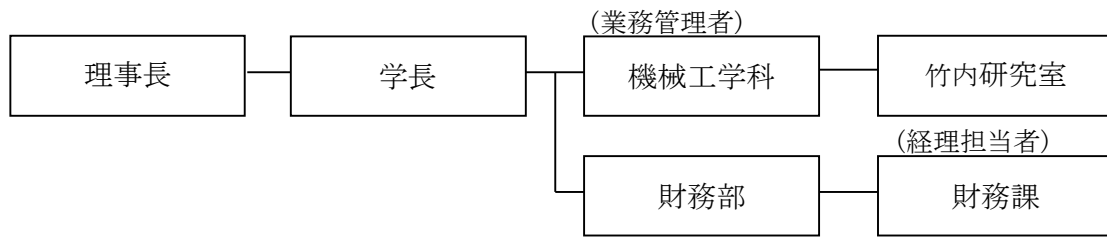
研究実施者 1 : トーメイダイヤ株式会社 (プロジェクトリーダー)
 研究実施場所 : トーメイダイヤ株式会社 小山工場 (主たる研究実施場所)
 所在地 : 〒323-0807 栃木県小山市城東4丁目5番1号



[プロジェクトリーダー]

氏名	所属・役職
吉川 博道	超高压焼結体事業部 新製品事業部 取締役部長

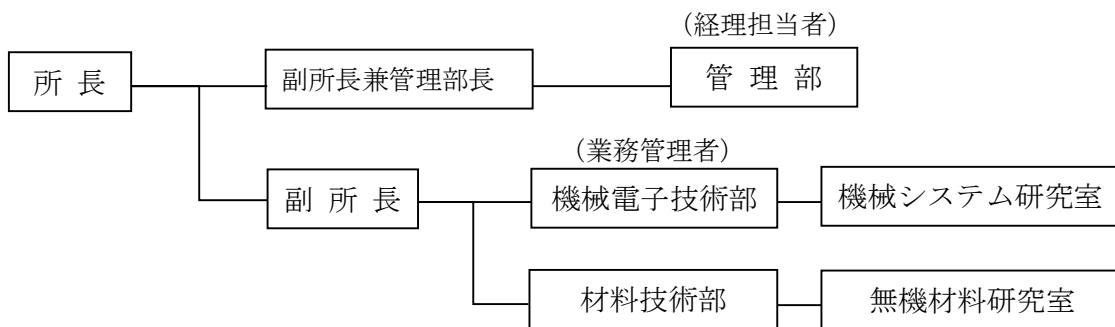
研究実施者 2 : 学校法人日本工業大学 (サブリーダー)
 研究実施場所 : 学校法人日本工業大学
 所在地 : 〒345-8501 埼玉県南埼玉郡宮代町学園台4番地1号



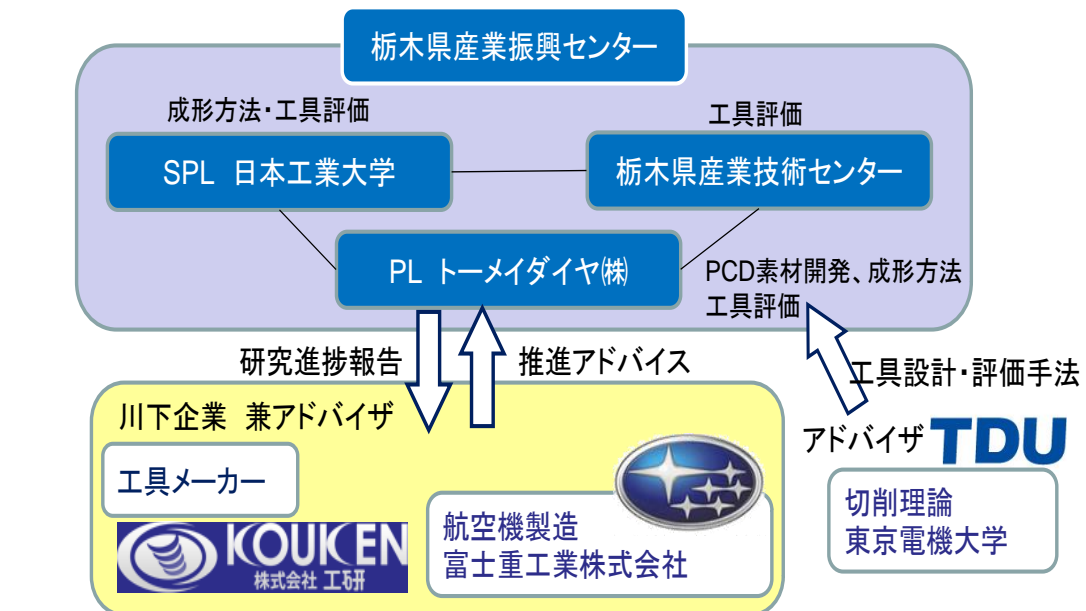
[プロジェクトサブリーダー]

氏名	所属・役職
竹内 貞雄	機械工学科 竹内研究室 教授

研究実施者 3 : 栃木県産業技術センター
 研究実施場所 : 栃木県産業技術センター
 所在地 : 〒321-3226 栃木県宇都宮市ゆいの杜 1 丁目 5 番 20 号



<プロジェクトの全体組織>



- ・**管理人:**
(公財)栃木県産業振興センター:プロジェクトの管理
- ・**共同研究体参画機関:**
 トーメイダイヤ株式会社:
 ①素材開発、②素材分析 ③形状成形検討・評価、④ドリル加工実験
 日本工業大学: ①再研磨技術、②ドリル加工の応用実験
 栃木県産業技術センター: ①PCDドリルの評価・解析
- ・**アドバイザー:**
 富士重工業株式会社:エンドユーザーとして加工評価全般に対するアドバイス。
 株式会社工研:工具メーカーとしてアドバイス。
 東京電機大学松村研究室:切削加工、工具設計のアドバイス。

図 1.3.1 アドバイザーを含めたプロジェクト組織図

1.4 成果概要

<事業の研究成果>

①ダイヤモンド焼結体の大型化の実現

最終目標のPCD 10mm厚（ダイヤモンド層厚み）を安定に焼結するために、昨年度十分に検証が出来なかった、昇圧・昇温がPCDサイズの大型化合成に与える影響を精査し、PCD合成時の焼結条件を見直すことにより、安定して10mmの厚みを有するPCD素材を合成可能にする焼結合成条件を検討した。その結果、H26年度クラックの発生が見られた焼結体の基材超硬の品質、ダイヤモンド粒子の調整、バインダー比の調整により、ダイヤ含有量が少ない焼結体に置いて10mm以上の厚さが合成可能である事を実証した。

②加工技術改善と新規加工技術の確立

PCD加工の効率化を図るために基礎研究を実施した。放電ダメージ層が少ない組成のPCDを開発するために、最適化したダイヤモンド素材とバインダーの比率調整を実施した。本事業で導入のドリル用ラマン分光分析装置を用いて、放電加工面のダイヤモンドの放電ダメージ層の状態の確認も実施された。その結果、放電加工効率が大幅に向上し超硬並みの加工速度を得、加工時のクラックも抑制される事が実証された。また、PCD工具の再生（再研磨）技術の検討を実施し、摩滅した刃先部に気相合成法でダイヤモンドを合成し刃付け研磨を行う為、大気圧プラズマトーチを開発、このトーチで前処理を行い、摩滅部分にダイヤモンド膜の肉盛が可能となった。また研磨困難な、気相合成ダイヤモンド膜を短時間で研磨できる気相エッチング条件を見いだした。PCDへのコーティング技術は成膜速度3 μ m/h以上の目標値を達成した。

③大型ダイヤモンド焼結体の工具化のためのシミュレーション技術及び工具評価技術の確立

PCDの工具としての課題を洗い出すために、放電加工後の品質を多角的に確認する手段の構築を実施した。PCDの最適な工具材としての評価の為に、開発しているPCDの熱物性値の測定値を切削シミュレーションのデータベースに取り入れ、H25～27年度に構築した手法により工具刃先形状を8パターン検討した。刃先にかかる応力や温度をシミュレーションにより比較し、工具欠損がおきにくい刃先形状を選定し、実加工により、実用可能であることを確認した。また作製された新組成サンプルによる穴あけ加工の評価により従来材種同等の耐摩耗性能を示した事からCFRP加工に適用可能であることが確認できた。更にユーザー環境に近いハンドツールによる評価環境の改善と評価が実施された。

※事業目標達成項目をアンダーラインで示す。

1.5 当該研究開発の連絡窓口

公益財団法人栃木県産業振興センター

総合支援部 研究交流課 主事 関口 徹

〒321-3226 栃木県宇都宮市ゆいの杜1丁目5番40号

第2章 本論

2.1 従来の技術

近年、航空機産業や自動車産業ではボディの軽量化による燃費向上を目的として、CFRP やチタン合金の適用が進められている。しかし、これら素材の加工は工具寿命や加工品質に課題がある。

近年の CFRP 加工工具用素材としては、高熱伝導と高い耐摩耗性を備えた多結晶ダイヤモンド焼結体 (PCD) や超硬母材にダイヤモンドがコーティングされたドリルが最適と考えられているが、表 2.1.1 のとおり、両工具ともに、いくつかの欠点があるため、現在も CFRP を高能率で高精度、かつ低コストに加工できる工具の研究開発が求められている。同表でもわかるように、多結晶ダイヤモンド焼結体のサイズが限定されることや工具成形が困難であることにより、工具の刃先のみ PCD をロウ付けした工具しかこれまで製作が行えていない。このロウ付け工具では、工具形状に制約があることや高コストであることにより、加工現場での利用が難しい現状がある。

表 2.1.1 従来工具と開発品との比較

比較一覧				
	従来品 (ろう付け)	従来品(一体焼結)	従来品(コート)	開発品
複雑形状への対応	×	×	◎	○
熱伝導率	×	×	△	◎
再研磨回数	○	○	×	◎
工具価格	△	△	◎	×(再研磨で◎)
デラミネーション	×	×	△	◎
バリ	◎	◎	△	◎

・CFRP加工で問題となるデラミネーション、バリは切削抵抗の増加や切れ味の低下で発生。従来品は発熱、ダイヤ層以外の摩耗で切削抵抗が増大しデラミネーションが発生する。CVDコート品はシャープエッジにならず、切れ味が劣る。
 ・開発品は工具コストは高いが長寿命、高速化、再研磨回数増によってトータルコスト低減が可能。

現在、CFRP の加工に使用されている工具は、超硬 (WC-Co) もしくは気相合成によるダイヤモンドがコーティングされた物である。超硬工具は摩耗が早く短寿命であり、コーティング工具は①再研磨が出来ない、②コーティングの厚さ分丸くなり鋭利な刃先が形成されない、③最適化されなければ剥離する等の問題点が存在している。一方で、ダイヤモンドの粉を高温高压で焼き固め、ダイヤモンド同等の性能を持たせたダイヤモンド焼結体 (PCD) はCFRP 加工用工具の素材として最適と考えられる。

現在市販されている PCD は殆どがダイヤモンド層 0.5mm 程度の非常に薄く、工具設計上、超硬との複合構造となり多くの問題点を有している。従って、ダイヤモンド層の厚い PCD を開発することで上記問題点が解消されると考えられている。トーメイダイヤ株式会社は、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に係る認定を受け

「大型ダイヤモンド焼結体による CFRP (炭素繊維強化熱硬化性プラスチック) 専用工具の高機能化」(平成 22 年 12 月 1 日～平成 24 年 3 月 31 日) を実施し、その結果として、直径 ϕ 50mm、厚さ 5 mm の大型ダイヤモンド焼結体を開発した。

更に翌年度には、栃木県産業技術センターとの重点共同研究テーマとして「CFRP 加工コスト低減の為の新硬質焼結体の開発 および専用工具の開発」(平成 24 年 4 月 1 日～平成 25 年 3 月 31 日) を行い、応用・検証を行った。

単純な構造を有する旋盤溝入れバイトを用いた二次元切削実験による結果では、図 2.1.1 に示す様に、PCD の CFRP に対する耐摩耗性に関して十分優れた大型焼結体が完成した事が示された。しかしながらドリル作製・評価により新たな課題が明確になった。下記に現状の 5mm 厚の大型 PCD ドリル製造工程を示す。製造は大凡 4 つのステップを踏み行われる。工程を図 2.1.2 - 2.1.6 に示す。

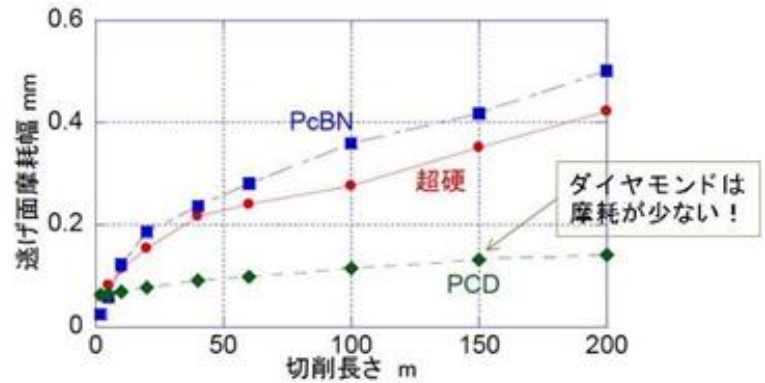


図 2.1.1 PCD 及び PCBN (CBN 焼結体) と超硬合金バイトでの逃げ面摩耗比較

1. 焼結工程 ダイヤモンドパウダーと超硬合金 W-Co を型内に入れ、高圧、高温の条件下において、PCD 焼結体を製造する。(図 2.1.2)
2. 素材切り出し 直径数十ミリ、PCD 厚さ最大 5mm の成型品をワイヤー放電加工によって、工具の所定直径に切り出す。(図 2.1.3)
3. 成形加工 放電加工と研削加工を同チャックで加工できる高機能な NC 工具研削盤を用いて、ドリル形状に成形する。(図 2.1.4)
4. ドリルの完成 (図 2.1.5)

この中で、通常の超硬工具と異なる部分は、放電加工による加工があることである。そのため、PCD に過大な熱流入があり、放電による欠陥が発生する。また PCD の放電加工時間はダイヤモンドが絶縁材料であるため、加工時間がかかり、成形条件の最適化や材料の最適化が課題となる。

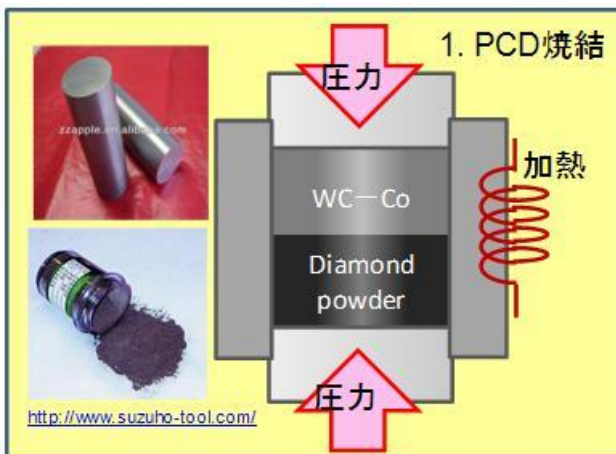


図 2.1.2 焼結工程

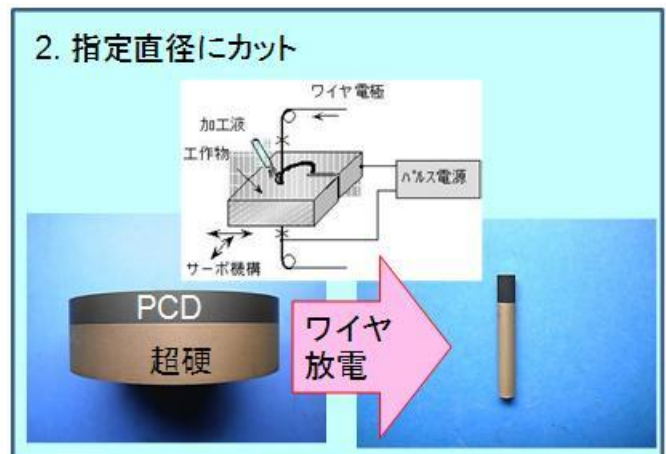


図 2.1.3 素材試料切断

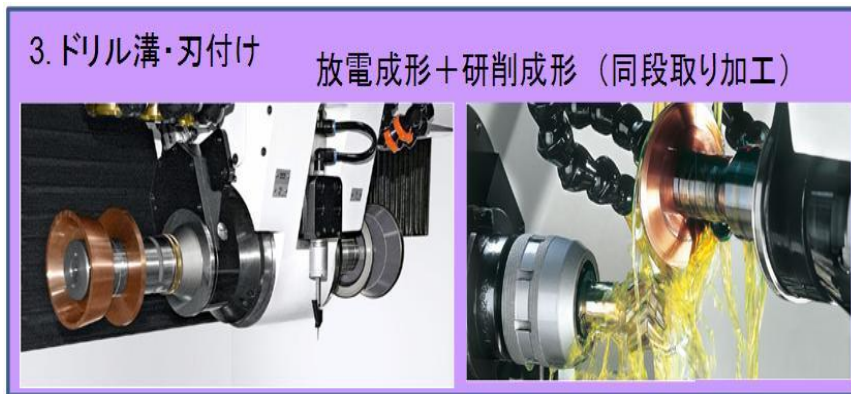


図 2.1.4 素材試料



図 2.1.5 ドリル完成

2.2 新技術「高機能多結晶ダイヤモンド工具の高生産性・低コスト化技術を支援するための、大型焼結体製造技術と工具形状成型技術の開発」

前述の従来の課題に対して、本テーマで目指す内容はPCD サイズ課題（ダイヤモンド層の厚み不足）に対して、焼結条件及びバインダーや造粒方法を見直す事で直径 50mm、厚み 10mm の大型のPCD 焼結体を開発する。（図 2.2.1）

更に、大型のダイヤモンド焼結体導入において新たに発生する課題として、PCD 加工性課題（工具形状への加工が困難）や放電加工課題（放電ダメージ層の存在）を設定し、各課題を研究・開発する事で優れた工具素材を提供する体制を整え、CFRP を取り巻く切削加工に対する最適な工具が供給できる環境を構築する。

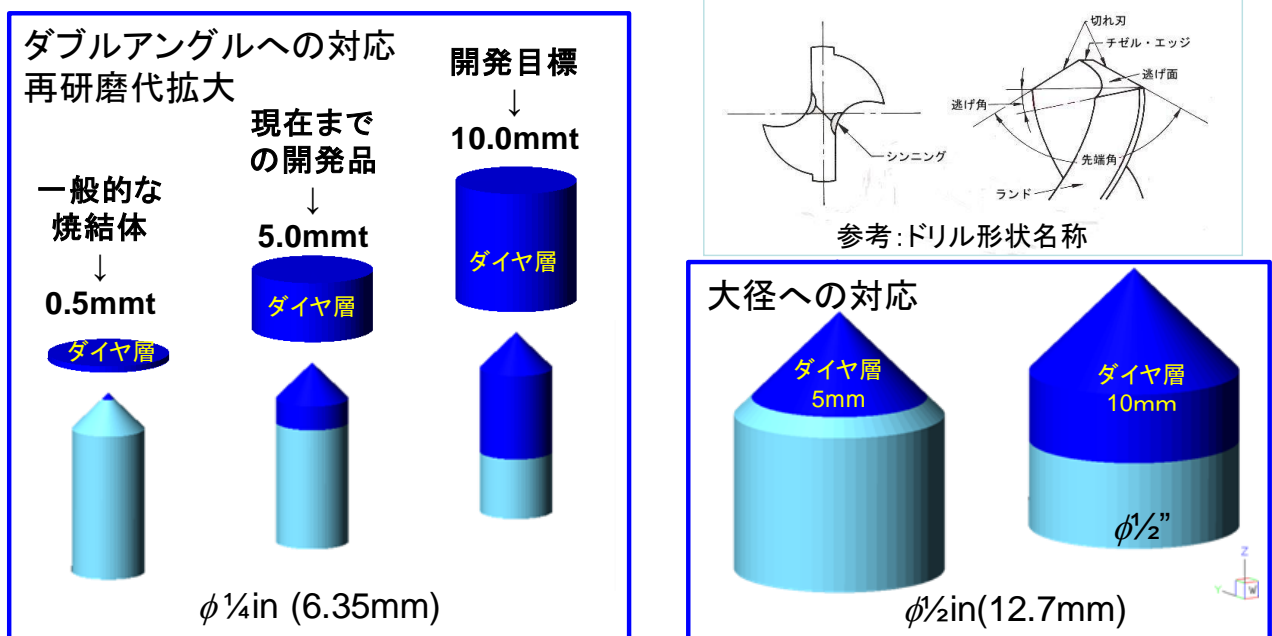


図 2.2.1 大型焼結体のドリル適用

2.3 課題

2.3.1 [課題 1] PCD サイズ課題への対応

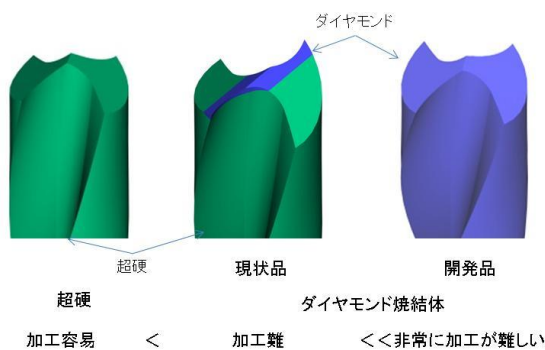
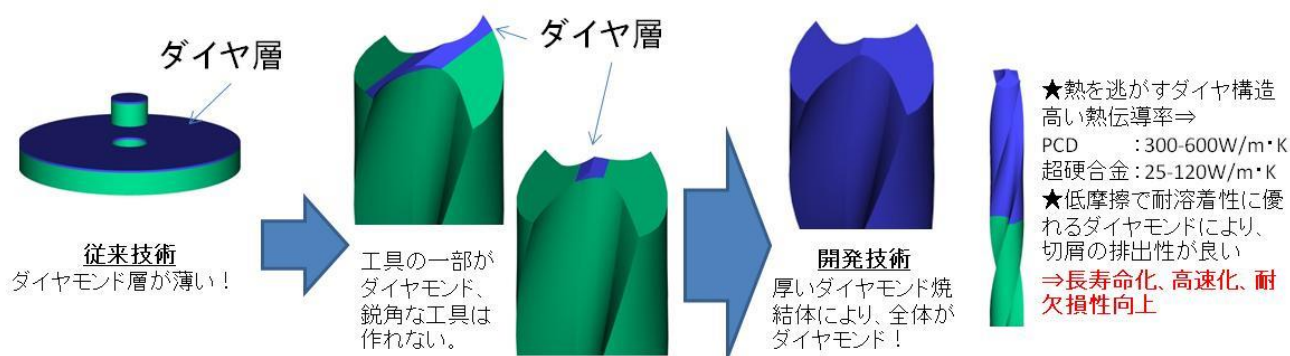
図 2.3.1.1 に示す様にダイヤモンド焼結体の大型化はCFRP 工具の問題点を解決する糸口となる。

そこで、課題1について、以下の内容について取り組む。

昇圧・昇温がPCDサイズの大型化合成に与える影響を精査し、PCD合成時の焼結条件を見直すことにより、安定して10mmの厚みを有するPCD素材を合成可能にする。また、ダイヤモンドパウダーを封入するカプセルの形状に関して、亀裂発生の原因の一要素として考えられる tensile stress が抑制可能なサイズに最適化すると共に、反応セルの構成部材の最適化を行い歩留まり向上を実現する。

2.3.2 [課題2] PCD加工性課題への対応

ダイヤモンド層の砥石による工具形状形成は不可能であるが放電加工では可能である。しかしながら実際は装置が高価かつ高度な加工ノウハウが要求され、加工効率も悪く、一部の加工メーカーのみが対応可能であると考えられる。結果、サイズアップしたPCDをCFRP用工具に加工可能な工具メーカーが少数になり素材の普及が望めない。従って、放電加工性の向上は重要な課題であると言える。(図2.3.2.1参照)



また、本開発品の重要な要素である再研磨による工具コストの大幅な低減を実現する為には、負荷が少なく効率の良い加工方法が必要になる。本事業では大気圧プラズマを利用した、研磨についての技術を確立する。

2.3.3 [課題3] PCD 工具の放電加工成型課題への対応

素材として高性能であるが硬く脆いダイヤモンドはその特性を理解して工具を設計する必要が

ある。実際に成形されたドリルによる実環境に近い評価と、実測が困難である加工刃先の環境をシミュレーションによる予測を併用し工具設計の最適を実現する。

2.4 実施内容

2.4.1 大型ダイヤモンド焼結体製造技術の確立（PCD サイズ課題への対応【課題1】）

焼結合成条件の最適化や未焼結品を発生させないための焼結技術の向上を目指してダイヤ層厚み 10mm（それ以上）の大型 PCD ドリル素材の研究開発を進めた。実施内容は、①-1 焼結合成条件の調整、①-2 焼結合成試料部材調整、①-3 焼結合成基本構造見直し、①-4 PCD 材種改善を実施した。

①-1 焼結合成条件の調整

焼結条件の圧力について調整した。焼結合成開始初期の加圧（昇圧）による試料及び部材が受ける圧縮・せん断応力による部材超硬基板の破壊（割れ・カケ）防止策として調整を行った。通常焼結合成では、開始直後比較的早く最高圧力に到達する。この時間が短すぎる為に各部材に掛かる局所的な応力により破壊が生じる。この破壊は、最終的に焼結合成が完了した後もかなりの確率で素材自体の割れ・カケの原因となり、ドリル素材の確保が安定しない要因となる。そこで、加圧が最高に到達する時間の段階的な昇圧で約 3 倍に設定し応力集中の緩和による破壊の軽減を実現した。図 2.4.1.1 に条件最適化によるクラックフリーな焼結体の合成結果を示す。

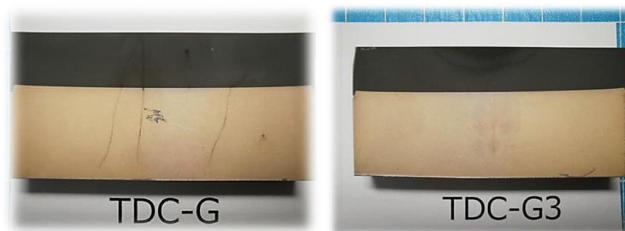


図 2.4.1.1 従来焼結合成品：TDC-G、条件調整焼結合成品：TDC-G3

①-2 焼結合成試料部材調整

超硬基板材種の見直し並びにダイヤ層（混合粉）の作り込み時の充填加圧方法の改善および超硬基板表面処理によるダイヤ層の剥離防止について各調整を行った。表 2.4.1.1 および図 2.4.1.2 に概略を示す。

従来超硬	超硬基板の諸特性	改良超硬
14.4	密度 (g/cm ³)	14.1
88	硬度 (HRA)	92
73	高温硬さ(800℃HRA)	78
1.8	抗折力 (GPa)	3.3
4.5	圧縮硬度 (GPa)	6.2
5.0	熱膨張係数(10 ⁻⁶)	5.4

表 2.4.1.1 従来および改良超硬基板特性

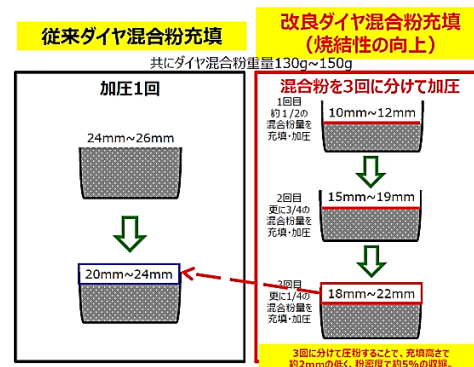


図 2.4.1.2 改良ダイヤ混合粉充填方式

①-3 焼結合成基本構造見直し

当初、素材焼結性の安定を期待し超硬金型セル方式での焼結合成を試みたが、超硬金型への衝撃による破壊から逆効果である事が判明した。

①-4 PCD 材種改善

合成時の応力緩衝領域を確保する等の目的で従来の原料（G材）からダイヤモンド含有量を減らしたG3材を用いた。焼結後の亀裂やRAMANによるダイヤモンドの損傷を確認した所、従来品よりも改善している事が確認された。

これら改善により図 2.4.1.3 に示す 10 mm厚のダイヤモンド層を有る焼結体がクラックが無い状態で得られ、多数のドリル素材を切り出す事が可能になった。

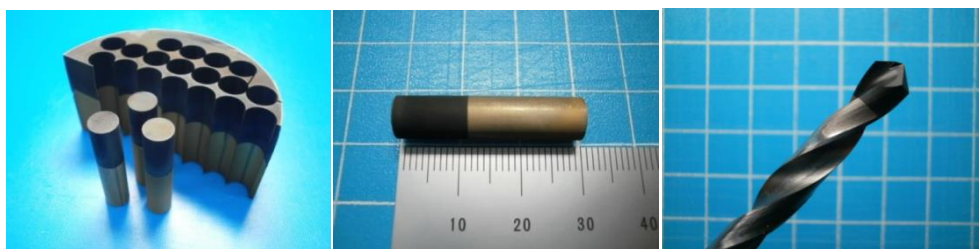


図 2.4.1.3 PCD ドリル素材およびPCD ドリル

2.4.2 加工性の向上と大気圧プラズマを利用した新加工技術の確立（[課題 2] PCD 加工性課題への対応）

課題1の金属バインダーの増量とその組成比の最適化により放電加工効率は超硬基材並みに向上した。その結果、加工条件を30%程度パワーを落とす事で加工ダメージは低減し、クラックの発生も抑制できている。上記素材の工夫により加工速度を極端に低下させる必要なく実現されている。図 2.4.2-1 に表面の放電加工によるダメージ改善結果を示す。

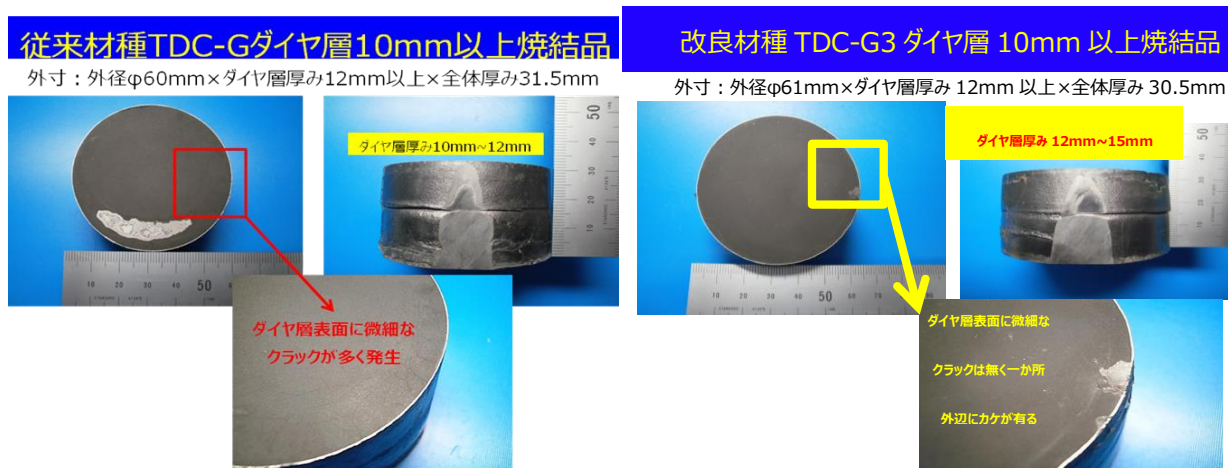


図 2.4.2.1 組成比最適化による放電加工ダメージの低減効果

次に、再研磨加工技術の新規提案を行った結果を示す。

図 2.4.2.2 に実験に使用した大気圧プラズマトーチの概観と構造を示す。大気圧プラズマの発生には 2.45GHz、1.2kW のマイクロ波発信器を用い、導波管で誘導したマイクロ波を用いて製作したトーチにて大気圧プラズマを発生させた。2重構造のガラス管から構成されており、内側ガラス管に

はアルゴン (Ar) ガスを導入する。ガラス管下部にはアンテナが設置され、マイクロ波を吸収・発熱してプラズマ発生のトリガーとして機能する。その外周部には反応性のガスとして水素 (H₂) または酸素 (O₂) を供給出来る構造となっている。また、外周部に流した反応性ガスと Ar プラズマ中で反応することで、ダイヤモンドのエッチングが可能な活性種を生成する。



図2.4.2.2 大気圧プラズマトーチの外観と構造

図2.4.2.3に最適化されたプラズマトーチにより得られたAr+O₂ 大気圧プラズマの様子と、同プラズマを超硬気基板に気相法によりコーティングした多結晶ダイヤモンド膜に照射した観察結果を示す。プラズマ照射した領域のダイヤモンド膜がエッチングにより除去され、下地が露出していることがわかる。

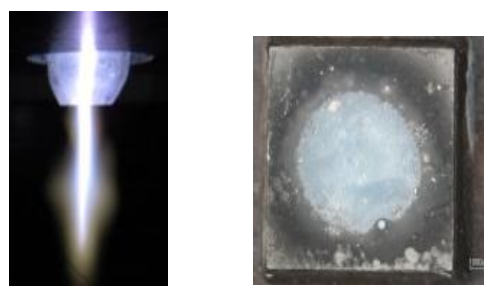
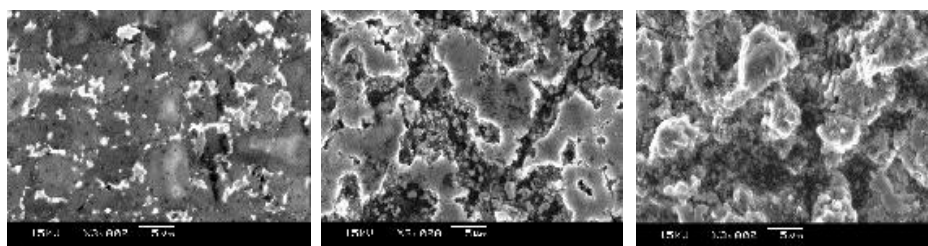


図 2.4.2.3 Ar+O₂ プラズマとエッチングされたダイヤモンド膜

価格的に高価な焼結ダイヤモンドドリルの普及のためには、数十回以上の再研磨を低コストで実施できる技術を開発する必要がある。数十回の再研磨を行った場合、直径の減少等により初期形状を維持することが困難である。この問題を解決するためには摩滅した部分のダメージ層を除去した上で気相合成法によりダイヤモンド膜を強固にコーティングする技術が不可欠である。種々の手法を検討した結果、減圧下の水素プラズマによる処理と超微粉ダイヤモンドによる種付け処理の併用を検討した。

水素プラズマ処理は、マイクロ波プラズマ CVD 装置を用いて、50torr の圧力下で 2 時間水素プラズマにさらした。この時の基板温度は 600℃ 程度である。大気圧プラズマは、Ar 流量:0.5L/min、O₂ 流量 0.5L/min として投入電力は 250W とした。なおこの時の大気圧プラズマは先の図 2.4.2.3 に示したものである。図



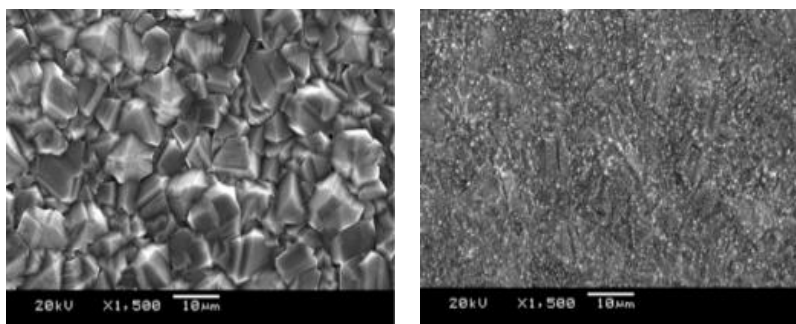
(a) 処理前 (b) 水素プラズマ処理後 (c) 大気圧プラズマ処理 + 水素プラズマ処理後

図 2.4.2.4 水素プラズマ処理後の焼結ダイヤモンド野観察結果

2.4.2.4に観察結果を示す。(a)処理前のPCDには、ダイヤモンド粒子が網目状にCoバインダーに囲まれている様子が認められる。(b)2時間の水素プラズマ処理を受けた試料では、ダイヤモンド粒子がアイランド状に残り、それぞれの周辺は浸食されたような不規則な形状を示した。このような形状が得られた理由は、粒界に存在するCoが600°C程度の低温でもダイヤモンドのグラファイト化の進行により、ダイヤモンド粒子の浸食が生じたためと考えられる。(c)大気圧プラズマ照射後(10分)に水素プラズマ処理を行った試料では、激しい浸食の様子が観察され、Ar+O₂の大気圧プラズマのエッチング効果が非常に大きい事を物語っている。図示はしないがラマン分光分析によればグラファイト成分は認められなかった。すなわち、Ar+O₂の大気圧プラズマにより加工変質層を完全に除去したのちに水素プラズマによるグラファイトの除去を行うことで、良好なダイヤモンド合成が可能となる基板前処理が可能となった。

さらに核発生密度と密着力の向上のために超微粉ダイヤモンドで種付け処理を行うという一連のプロセスを踏んで、ダイヤモンド膜のコーティングを試みた。なお、コーティングは、熱フィラメントCVD合成装置により行った。図2.4.2.5(a)にダイヤモンド膜のコーティング状況を示す。ダイヤモンド膜に凹凸や異常成長の痕跡が認められるものの、PCD上にダイヤモンド膜の再コーティングが可能であることを確認した。また同図(b)には、大気圧Ar+O₂プラズマをダイヤモンド膜に10分間照射した時の観察結果を示す。多結晶構造で異なる結晶面を有するダイヤモンド膜が特定の結晶面や結晶粒界が選択的にエッチングすることなくエッチングされていることがわかる。

このように開発した大気圧Ar+O₂プラズマを用いてPCDにダイヤモンド膜をコーティングするための下地処理技術を開発した。また、Co等の金属バインダーを含まない気相法によるダイヤモンド膜の気相エッチングも可能なことを検証した。



(a) 基板処理後に熱フィラメントCVD法で合成したダイヤモンド膜

(b) ダイヤモンド膜をAr+O₂プラズマでエッチングした結果

図2.4.2.5 PCD上にコーティングしたダイヤモンド膜と、同膜をAr+O₂プラズマを照射した時の観察結果

2.4.3 大型ダイヤモンド焼結体の工具化のためのシミュレーション技術及び工具評価(PCD工具刃先の切削温度の評価【課題3】)

2.4.3.1 チタン合金加工の切削シミュレーション

航空機構造部材として、CFRPとチタン合金を重積して同時に穴あけが行われる。そのため、当該事業で開発するPCDドリルに対しては、CFRPのみの穴あけのほかに、チタン合金に対する適用性に関する調査が必要である。チタン合金は熱伝導率が低いため、その切削加工においては切削温度が高くなりやすい。600°Cを超えるような環境においては、PCDの組成の劣化が懸念されるため、切削加工中の温度の調査は重要である。しかし実験的な切削温度の調査は非常に困難である。このような場合に、切削シミュレーションによる温度評価は有効な手段である。

そこで、本項では有限要素法による切削シミュレーションを行った一部の内容について示す。シミュレーションでは各材種の物性値を実際のサンプルから取得し、シミュレーション内に反映させ、チタン合金(Ti-6Al-4V)加工時の温度解析を行い、刃先形状が工具温度や切削力等に与える影響を調査した。

有限要素法によるシミュレーションソフトウェア (AdvantEdge、Third Wave Systems) を用いて切削加工のシミュレーションを行った。切削条件は切削速度 30 m/min、切削厚さ 0.05mm とした。

工具形状の例を図 2.4.3.1 に、設定した条件を表 2.4.3.1 に示す。すくい角は 0deg.、30deg. の 2 種類とし、それぞれにおいて刃先のチャンファ長さを 5、10、15、20 μ m の 4 種類に設定した。また、チャンファ角度は 25deg. とした。以下、工具形状を表す際には、チャンファの長さ (μ m) を c、すくい角(deg.) を r とし、c5-r30 のように表記する。

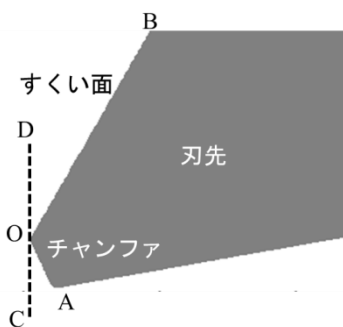
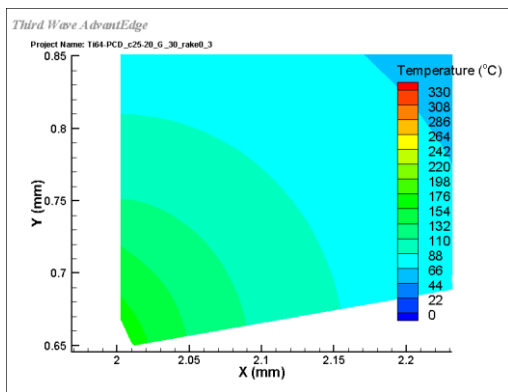


図 2.4.3.1 工具形状

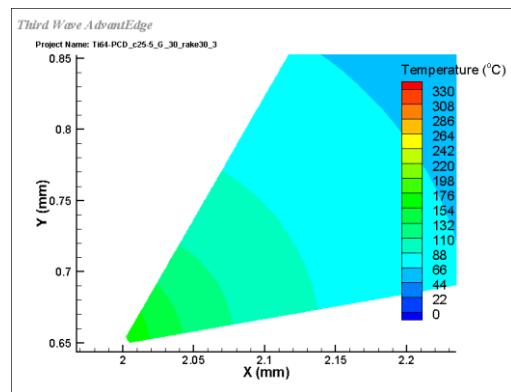
表 2.4.3.1 切削シミュレーション工具形状

すくい角 $\angle DOB$	0、30deg.
チャンファ長さ OA	5、10、15、20 μ m
チャンファ角度 $\angle COA$	25deg.

図 2.4.3.2 に工具温度のコンター図の一例を示す。工具温度については、すくい角やチャンファ形状による差異はほとんど見られず、どの条件においても 300 $^{\circ}$ C 以下であり、材料が劣化する温度 (600 $^{\circ}$ C) よりも低かった。したがって、工具形状の違いは温度にはあまり影響がなく、どの条件においても温度上の問題はないと考えられる。



c20-r0



c5-r30

図 2.4.3.2 温度分布

切削力のシミュレーションを行ったところ、すくい角 30deg. とすることで切削力が低くなることが確認されたため、以降はすくい角 30deg. における解析結果を示す。

図 2.4.3.3 に、最大主応力のコンター図の例を示す。すくい面上の切削厚さより高い領域には引張方向の応力が発生していることが分かる。PCD は脆性材のため引張応力に弱いとされていること

から、この引張応力は工具欠損の一因であることが考えられる。そこで、横軸に工具先端からの距離、縦軸に最大主応力をプロットしたグラフを作成し、各工具形状での最大主応力の値を比較した。

図 2.4.3.4 にすくい角 30deg. における結果を示す。最大主応力はチャンファ長さ 5 μm で最も大きく、その最大値は 1500MPa 程度となっている。

PCD は脆性材料であることから、部材の内部に発生する最大主応力が材料の強度に達した時に破損を生ずるとされているため、最大主応力と PCD の強度を比較した。TDC-G3 の破壊強度は 1200～1400MPa であるため、5 μm のチャンファでは破壊強度を上回り、欠損する可能性がある。したがって、すくい角 30deg. の場合は、破壊強度以下となる 10 μm 以上のチャンファが適していると考えられる。導き出された刃先形状(チャンファ 10 μm)にて PCD ドリルを作製しチタン合金の穴あけ試験を行い、チタン合金穴あけに適応可能であることを確認した。

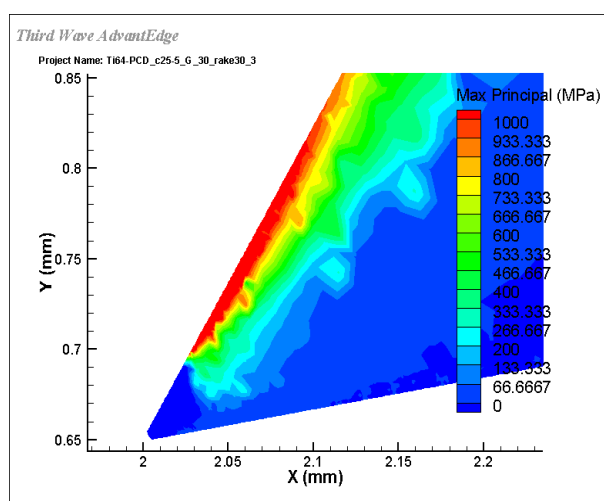


図 2.4.3.3 最大主応力 (c5-r30)

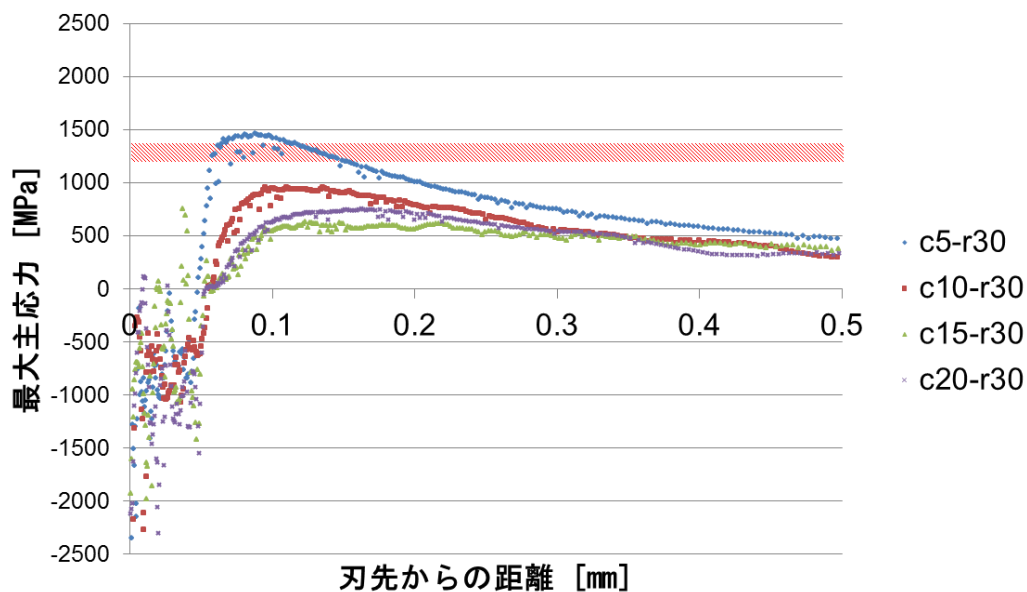


図 2.4.3.4 最大主応力 (すくい角 30deg.)

2.4.3.2 ハンドツールを用いた試験環境の構築

本事業により開発した工具を航空機構造部材加工における幅広い領域で活用するためには、ユーザーの加工環境を想定したハンドツールによる加工テストを行うことも必要である。そこで、現場で用いられている装置と同様のハンドツール(エレコンフィーダ)及び加工時の切削力の測定を行う工具負荷測定装置(9272、KISTLER)を導入し、図2.4.3.5に示す評価環境構築を構築した。工具負荷測定装置上部の被削材固定治具に板厚4mmのCFRP板(T800SC+Epoxy, TORAY)を固定し、切削速度50m/min, 工具送り速度0.05mm/revにて穴あけ実験を行った際のマシニングセンタ(YBM640Ver.3, YASDA)とハンドツールの切削力波形の比較を図2.4.3.6に示す。スラストについてはマシニングセンタを用いた穴あけと同様に切削力が推移しているが、変動幅が大きい。トルクについては変動が著しく大きく、力も大きくかかっている。工具の振れが大きいことにより、切削力の変動が大きくなり、刃への負荷が過大となる。ハンドツールに用いるドリルにおいては、刃先の強度を上げ、切削力の変動に耐えられる刃先形状を設計する必要があると考えられる。

ユーザーの加工環境を想定した試験システムを構築し、工具の詳細な評価を行うことが可能となった。

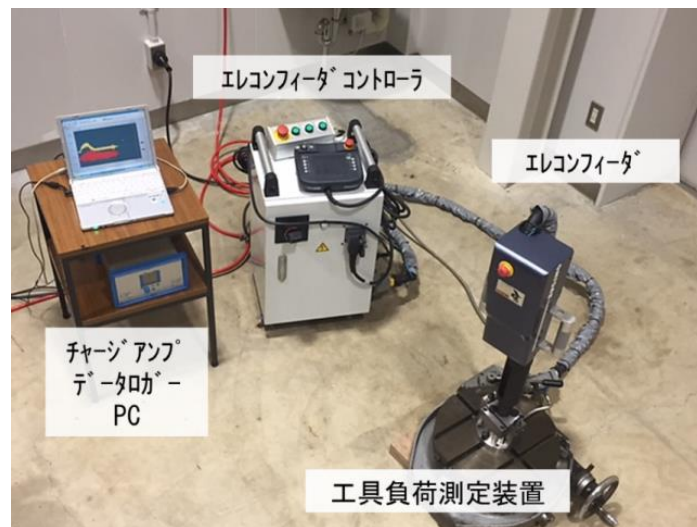


図 2.4.3.5 ハンドツール切削試験システム

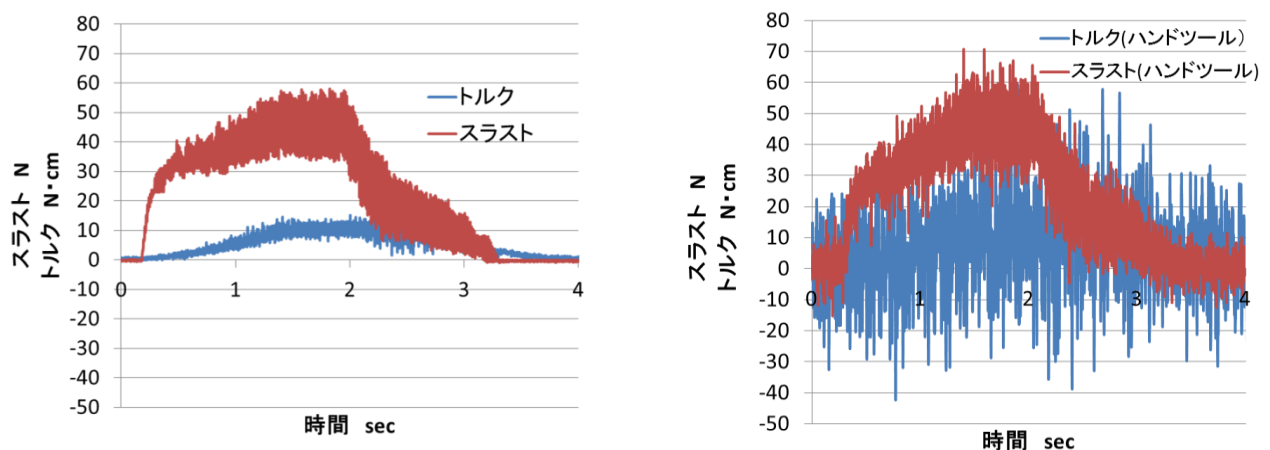


図 2.4.3.6 穴あけ時の切削力 (左 マシニングセンタ) (右 ハンドツール)

2.4.3.3 マシニングセンタによるPCD 工具評価

本事業で開発する PCD ドリルを CFRP の穴あけ作業へ適用するためには、安価な超硬ドリルと比較して、高価な工具に見合った飛躍的な工具寿命の向上が求められる。また、CVD ダイヤモンドコーティング工具との比較では、工具摩耗の進行が同程度であれば再研磨の可能なPCDが優位となる。そのため本項では、マシニングセンタを用いて CFRP の切削に対する PCD ドリルの評価を行う。

TDC-G(PCD)及びTDC-G3(PCD)、CVD ダイヤモンドコーティング、超硬の計4種の直径6.35mmのドリルを用いて CFRP に対する工具摩耗について調べた。マシニングセンタのテーブルの上に210個の直径10mmの下穴があけられた被削材固定用治具を取付け、上部に200mm×200mm、板厚4mmのCFRP板(T800SC+Epoxy、TORAY)を固定し、主軸回転数501r.p.m.、工具送り速度0.025mm/revにて500穴の穴あけ試験を行い、ドリルの逃げ面摩耗幅をデジタル顕微鏡(VHX-100、KEYENCE)で測定した。結果を図2.4.3.7に示す。

組成改良を行ったTDC-G3のドリルは、TDC-GのドリルやCVDダイヤモンドコーティングドリルと同等の摩耗進行をしており、超硬と比較すると大幅に摩耗進行が遅いことがわかった。放電加工性や歩留まりが良く、再研磨も可能なTDC-G3のドリルがCFRP加工に適していると考えられる。

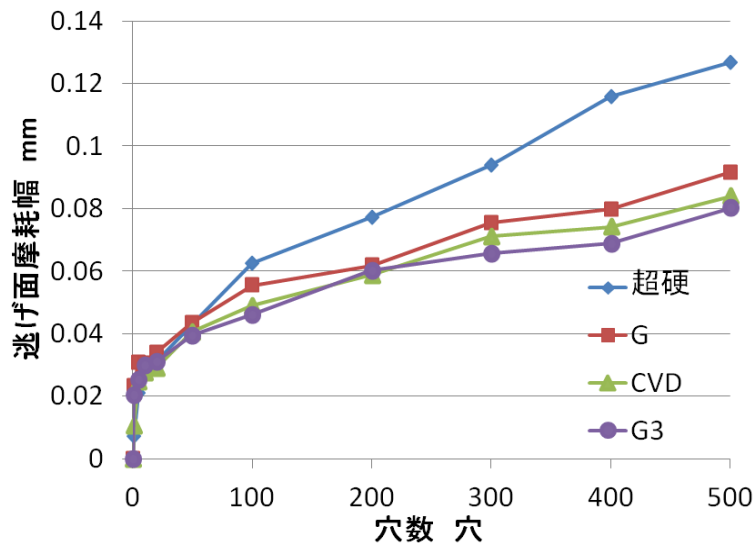


図 2.4.3.7 ドリルの逃げ面摩耗進行線図

第3章 全体総括

3.1 3年間の研究開発成果と考察

平成 25, 26 年度は、基礎的な実験や環境や試験方法のノウハウの構築が殆どを占めた。特に焼結体のダイヤ層拡大が非常に困難であった為に、後工程（工具化、評価）が遅延する状況が続いていた。合成試験における労力とコストも負担ではあったが、数字に表れない技術的な積み重ねが伝承されていない事も原因の一つであり、今後の物づくりの課題として残った。戦略物質と言っても過言でない重要な特性を有するダイヤモンド製品をゼロから作る事が出来る唯一の国内専門メーカーとして、その責務を果たす為には、体制の見直しも視野に入れたアプローチが求められる。

しかしながら、最終的には焼結体が目的の 10 mm を超える 12mm まで拡大できた事で、本事業の目標は達成できたと言える。更に、この素材を活かす為に必要な周辺技術に関しても、工具設計の効率を向上させるシミュレーション、ユーザー環境の不確定な要素を取り入れた素材テスト環境の構築が成された。先進的なアプローチとして大気圧プラズマによる PCD 及び CVD ダイヤモンドの処理手法及び新規装置の開発が成され、より広く本事業の成果物が産業に使われる可能性を示す事が出来た。

3.2 今後の課題と事業化展開

事業終了後の平成 28 年度はユーザーに近い評価に軸足を移すとともに、引き続き基礎的な材料評価と合成を行い、商品化を確実なものとして行く。特に 3 つの課題について以下の予定で研究開発を進める。

【課題 1】大型化された PCD の質の向上及び生産性の検証。

【課題 2】再度ボロンドープ PCD について焼結方法と放電加工性の検討を行う。またその他の PCD についても放電加工性を調査する。放電等の加工方法の最適化を目指す。

【課題 3】工具として使用することを考慮した分析方法や解析・実験方法を高度化し、課題 1 と 2 に対して、フィードバックできる研究を継続する。

製品化に関しても、下半期を目途に新製品としての展開を検討している。（図 3.2.1 参照）

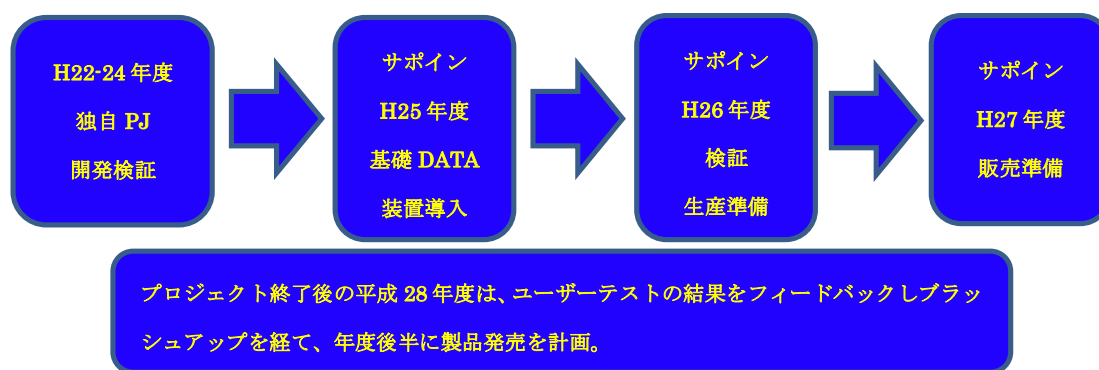


図 3.2.1 本事業の流れと今後のフロー