平成30年度採択 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

「難削材の高精度高能率切削加工を実現するハイブリッド工具の開発」

研究開発成果等報告書

令和2年3月

担当局中部経済産業局

補助事業者 公益財団法人中部科学技術センター

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 ・・・・・・・・・・・ 1
1-2	研究体制 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 7
1-3	成果概要 •••••• 8
1-4	当該研究開発の連絡窓口 ・・・・・・・・・・・・・・ 9
第2章	本論
2-1	工具刃先の強化改善 超長寿命化の研究 ・・・・・・・・・・・ 10
2-2	CMP 砥石形状の最適化及び加工条件の定量化 ・・・・・・・ 13
2-3	工具形状開発及び材料改善・・・・・・・・・・・・・・・ 16
2-3	切削テストによる最良切削条件の研究及び材料解析 ・・・・・・・ 21
第3章	全体総括
3-1	研究開発成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
3-2	今後の課題 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
3-3	事業化展開について ・・・・・・・・・・・・・・・・ 25

第1章

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1)研究開発の背景

〈概要〉

プロジェクトリーダーであるシー・ケィ・ケー(株)は、切削工具の製造及び再研磨事業を生業としている。近年、航空機部品加工用の切削工具の開発依頼が多くあり、従来の技術で切削工具を製造してきたが工具寿命や製品の加工不良の問題が改善できなかった。そこで名古屋工業大学の切削工具の刃先を鋭利化する技術を応用して問題解決を図るように、共同で本研究開発を開始した。

本研究開発は、従来、物理的反応と捉えられてきた切削加工を化学反応の見地より捉え工具製造法では世界初の工具超長寿命化加工機械と化学物理的研磨(以下、CMP とする)加工機械を開発し、切削工具の鋭い切れ味と硬度・剛性を大幅に向上させた新規工具を研究開発する事で、上記問題の解決【品質改善(製品の安心安全化)】を図る。また同航空機部品(超耐熱合金)の加工ロスに対応し、将来的なネットシェイプ化の要望に対しても必要となる恒温鍛造用金型部品の強度や耐久性が向上する加工を可能にする。具体的には、長寿命化加工一CMP エンドミル、長寿命化加工一CMP ドリル、長寿命化加工一CMP チップを開発すると同時に既存工具の再研削【リサイクル化】も実施し、航空機産業を始めとする川下企業の劇的なコスト削減【目標値従来対比▲40%】を図る。

〈背景〉





図1 羽田空港での大韓航空機出火事故

図 1 は、金属疲労が原因でエンジンが破損し出火したものと考えられている羽田空港でおきた大韓

航空機出火事故である。運輸安全委員会は出火した左エンジンの後部にあるタービンディスクと呼ばれる円盤状の金属部品が破損していたと発表した。これまでの調査で、ディスクに取り付けられたブレード(回転翼)が破断、カバーを突き破り滑走路に散乱したと判明していたが、さらに内部の部品も破損していた。

このように航空宇宙産業に多く使用される難加工材(炭素繊維、チタン合金、Ni 基合金等)において、従来の切削では、航空機のタービン等の安全性に重大な影響を及ぼす部材に切削加工による加工 歪(表面及び内部応力)が発生し、短時間に金属疲労が発生し破壊につながる危険性が大きい。

〈研究開発の動向〉

航空機の機体材料や動力部品の材料には炭素繊維やチタン合金の他、Ni 基合金などが耐熱部品材料として使用されている。このような部品の大部分は切削加工法によって加工されるが非常に加工性が悪く、切削工具の早期磨耗に加え、切削速度を速めると被削材表面に加工歪が大きく発生するため、加工時間が非常に長く掛かる事など大きな問題が発生している。このような問題を解決するため、従来から多くの研究が行われているが、何れも工具形状(切れ刃を構成する角度)の開発や PVD(物理蒸着)コーティング等の表面処理に終始しており、現在に至っても抜本的な問題解決には至っていない。

〈従来技術での課題〉

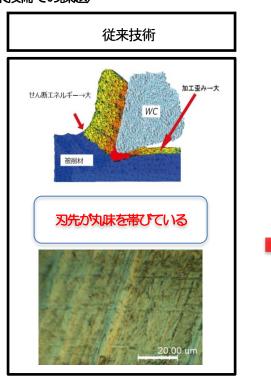


図2 従来の超硬工具による切削模式図とチタン合金の加工面

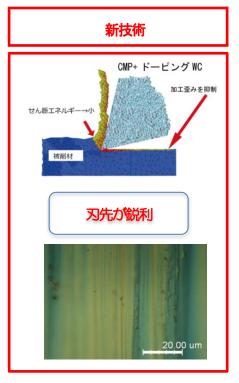


図3 新規工具による切削模式図とチタン合金の加工面

従来技術の課題と新技術の特徴

課題

- ・部品の加工面に歪みが発生
- 切削工具の早期磨耗
- ・部品の加工時間が長い

新技術の特徴

- •切削加工時の歪みを大幅に抑制する
- 切削工具の長寿命化
- 加工時間の大幅な短縮

図 2 は既存工具による切削模式図で、その下には当該工具においてチタン合金を加工した加工面を示す。既存工具の刃先丸みは 4~6 μm と鈍いため、切削抵抗が増大し切削時に高い発熱が起きる。そのため切削加工面は大きな歪が発生している。図 3 は新規工具による切削模式図とチタン合金の加工面である。新規工具は超長寿命化-CMP 法によって刃先丸みは既存工具の 1/10 以下になり、更に刃先強度も上がる。その結果、切削抵抗は大幅に減少し熱の発生を抑制できるため、切削後の加工歪は非常に小さくなる。

〈新技術を実現するために解決すべき研究課題〉

製品の品質及び安全性の確保、高効率化等に対する川下製造業者等からの要求水準は高まっており、これに対して機械・機器製品全般の高度化が必要とされている。そのため、機械・機器製品を構成する部品について、より高い加工精度が求められている中、特に航空宇宙分野において機体の大型化や航続距離延長の観点から機体の軽量化が求められ、CFRP等の複合材の導入がすすめられている。またエンジンの燃費向上の流れを受けたタービン部の高温化に伴いエンジン関連機器・部品では超耐熱鋼が用いられる。これらの材料は難加工材であり、機械加工のコスト削減、リードタイム短縮と品質向上が望まれている。

図4は本研究で開発する切削工具種類とその使用部品箇所である。

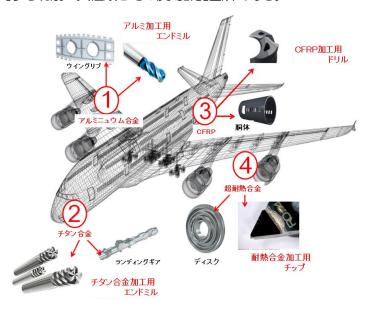


図4 切削工具種類とその使用部品箇所

表1に図4の加工部品箇所①~④に使用する工具と新技術と従来技術の比較を示す。①から④の各種切削工具に超長寿命化加工-CMP 加工を付加することで従来技術の問題を解決する。

表1 加工部品箇所①~④に使用される工具の新技術と従来技術の比較

航空機部品	工具種類	従来技術 (問題)	新技術
① 機体構造材	形状加工用工	びびり、バリ発生	・切削抵抗低減による低振動にて切
(アルミ合金)	ンドミル	• 溶 着	削によるバリレス加工を実現
② ランディングギヤ	形状加工用工	・加工時間が長い	・切削抵抗低減・刃先強度増大で
(チタン合金)	ンドミル	•加工歪、大	加工歪を抑制し加工時間の大幅
		・工具寿命が短い	な短縮と工具寿命延長が可能
③ 機体構造材	穴加工用	・バリ、 剥解発生	・切削抵抗低減による低振動にて切
(CFRP)	ドリル	・工具寿命が短い	削によるバリレス加工と工具寿命延
			長が可能
④ ジェットエンジン	円筒加工用旋	・加工時間が長い	・切削抵抗低減・刃先強度増大で
品等	削チップ	・加工歪み大	加工歪を抑制し加工時間の大幅
(耐熱合金)		・工具寿命が短い	な短縮と工具寿命延長が可能

(2)研究目的•目標值

〇研究目的

従来から切削加工に使用される超硬工具は炭化タングステン(以下、WC とする)の粒子をコバルト等の結合層を介して構成されている。超硬工具はダイヤモンド砥石で加工されるが、WC はダイヤモンドと化学反応を起こし W2C となるため硬度が低下する。更に WC 粒子も脱落するため、切れ刃エッジ部は図5のように丸く鈍くなるため切れ味が悪く切削抵抗が増大する。そのためチタン合金等の加工表面は切削時に発生する摩擦熱により歪(変質層)が発生する。歪が発生した材料表面は本来その材料のもつ強度や靱性を低下させ製品寿命が短くなるなど重大な問題を残している。更に工具寿命が極端に短いことや、熱の発生を抑えながら切削するため、製品加工時間が非常に長くなり加工コストも高額になっている。

本研究の原点は切削加工現象を従来のような物理的変形だけに止めず、金属元素同士の化学反応と捉えたことであり、耐熱合金等の切削加工において熱の発生を制御する核心的加工技術を実現させるものである。具体的には CMP 技術を用いて超硬工具の切れ刃エッジを鋭利化し、さらに超長寿命化手法を使い工具切れ刃部分に異種元素をドープし硬度と強度を大幅に向上(材料改善)させることで、難削材の無変質高能率加工を実現するという、従来の工具開発法に対し新しい独創的な設計思想に基づいた開発法で切削工具を開発する。特に本開発による刃物は切削抵抗が少なく、図5に示す様な無垢材料から80%以上も削る工程も多い航空機能配等の製作においては、荒加工(断続切削が想定される)から仕上げ加工まで高能率加工(一気通買加工)を実現できる。

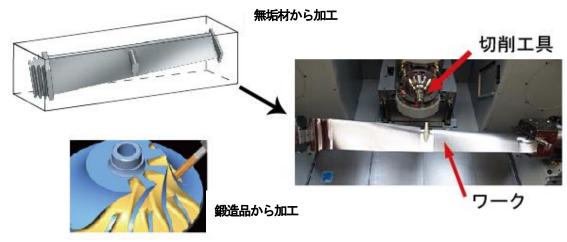


図5 (航空機) 部品加工工程

○研究目標

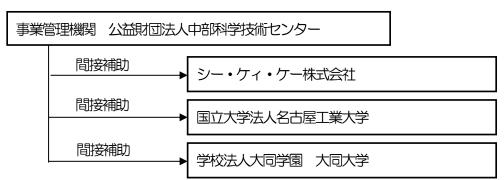
本研究開発は、CMP 技術を用いて工具の切れ刃エッジを鋭利化し更に、超長寿命化手法を使い工具切れ刃部分の材料改善を行うことで切削工具の鋭い切れ味と硬度・剛性を大幅に向上させた新規工具を開発し、従来加工で生じた歪による製品の劣化を防ぎ、製品寿命が長く、安全性の高い高品位な製品をめざす。更に工具寿命を大幅に延長できるとともに加工時間の短縮が可能になる。本研究によって開発された工具は従来の問題点を改善し難削材や高硬度金型部品の無変質高能率加工を実現する。

開発工具は、超長寿命化加工+CMPの二つの技術を融合するもので有り、超長寿命化加工-CMP工具と称するものとする。

本研究に於いて開発される超長寿命化-CMP 工具は、切削工具の切れ味の良否を分ける刃先エッジ 部を従来工具の 3μ m~ 5μ m を 1/10 の 0.5μ m 程度まで鋭利化できる。刃先丸みを 0.5μ m 以下 にできることで切削抵抗を大幅に抑制でき、その効果により航空機部品等の難加工材料で長時間を要していた切削加工時間を半分以下に短縮でき、航空機部品の大幅なコストダウンを可能にする。更に 超長寿命化加工により工具切れ刃の硬度も向上するため工具寿命も長くなり、大きなトータルコストダウンとなる。

1-2 研究体制

(1)研究組織・管理体制



(2) 研究者氏名 · 協力者

【事業管理機関】公益財団法人中部科学技術センター

管理員

氏 名	所属•役職
平本 邦夫	研究開発推進部長
高須 容功	研究開発推進部 主任
木本 恵子	研究開発推進部 主任
土谷 由貴子	研究開発推進部
松下 純恵	総務部

【間接補助事業者】

シー・ケィ・ケー株式会社

氏 名	所属•役職
澤田 秀司	代表取締役
青木 渉	技術顧問
澤田 純嗣	専務取締役
岡澤 康広	生産管理部 部長
南 博展	生産管理課

国立大学法人名古屋工業大学

氏 名	所属•役職	
江龍 修	しくみ領域を教授	

学校法人大同学園 大同大学

氏 名	所属•役職
西脇 武志 井上 孝司	工学部機械工学科 教授 工学部機械工学科 特任教授

1-3 成果概要

【1. 工具刃先の強化改善 超長寿命化の研究】(実施機関:名古屋工業大学)

先行研究の工具材料開発で、新規の異材混入技術により従来の工具材料(炭化タングステンを主材料にしたもの)に、切れ刃部分の焼結材料の粒子間に高硬度材料を拡散混入させ、切削工具の強度(切削 長の増加:長寿命化)を向上させた。

【2. CMP砥石形状の最適化及び加工条件の定量化】(実施機関:名古屋工業大学)

先行研究で、超硬工具の主材料であるWC を変質することなく工具刃先の鋭利化を実現する研磨技術 CMP 法を開発した。その技術を応用し、刃先丸みを従来の 1/10 以下(0.5 μ m 以下)の鋭利化を実現した。これにより切削時の化学反応を最小に抑えることで耐熱合金等の難削材料の切削加工において問題を改善することが期待される。

市販の超硬チップに CMP のみ施し Ti-6AL-4V を旋削加工した結果、切削距離は 3 倍 (754 m→2262m) に延びた。同様に、Inconel718 を旋削加工した結果、切削距離は 2 倍 (427m →875m) に延び、更に超長寿命化を行った超硬チップでは 10 倍 (437m→4222mワークの 限界により中断) の旋削試験の結果が得られた。

また、旋削加工時の切粉の色から加工熱が抑えられていることが確認でき、被削材へのダメージが減少したと推察される。

【3. 工具形状開発及び材料改善】(実施機関:シー・ケィ・ケー株式会社)

難削材の高能率加工を実現する工具形状の研究をした。耐熱合金等の切削加工によって発生する加工でを最小にでき、高能率・高精度加工を実現する工具形状を開発した。

工具形状を変化させ、切削時の振動を抑制し、ねじれ角やすくい角などを調整し切削性の良い形状を最適化した。

また、3次元工具に対し超長寿命化加工をする装置及びCMP加工をする装置を開発した。

【4. 切削テストによる最良切削条件の研究及び材料解析】(実施機関:大同大学)

開発されたCMP法を使い作製した旋削用超硬チップに対して切れ刃形状精度と表面性状を詳細に 調査した。解析に当たっては、電子顕微鏡(SEM)による工具すくい面を高倍率観察し合わせて 工具すくい面表面の電子線分析(EDX)を行い詳細に解析した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

シー・ケィ・ケー株式会社 生産管理部長 岡澤康広

Tel: 0569-21-6187 Fax: 0569-23-6427

E-mail: okazawa@ckk-tool.co.jp

第2章 本論

- 2-1 工具刃先の強化改善 超長寿命化の研究(実施期間:名古屋工業大学)
- 2-1-1 超長寿命化効果検証及び特定被削材(工具材料)向け膜組成の検討、開発

超長寿命化実験では、最適な波長や加工時間による対象物への深度の研究が進めた。超長寿命化加工を市販の超硬チップに対して行い、川下ユーザー企業で切削に対象を行った。被削材の切粉に変化が見られ、切削時の温度の違いがあったと推測される。

工具への金属元素堆積と超長寿命化効果検証及び特定被削材(工具材料)向け膜組成の検討、開発に加え、切れ刃エッジ部への成膜の可能性の検討及び工具母材への元素拡散層形成による膜蛍活着法を研究も行った。

2-1-2 切れ刃エッジ部への成膜の可能性の検討および工具母材への元素拡散層形成による膜強 活着法の研究

先行研究の工具材料開発で単結晶製造技術より派生させた新規の異材混入技術により従来の工具材料(炭化タングステンを主材料にしたもの)に対し、切れ刃部分の焼結材料の粒子間に高硬度材料を拡散混入させ、切削工具の強度を向上させる。

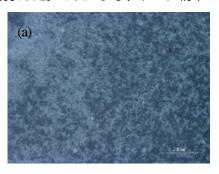
具体的には、超長寿命化効果検証を深化させるため、より深度への成膜を目指した研究、成膜材のドープ粉末の微細化、加工時間に関する研究を実施した。

更に超長寿命化効果を得るため、超硬チップの刃先への更に深い位置まで元素拡散層を目指すため、成膜材であるドープ粉末の微細化を行った。具体的な方法として、沈降分級と遠心分離を行った。また、超長寿命化加工時間を 1 分から 10 分まで変化させ、元素拡散層の深さを制御した。

主にドープ材の精密分級による成膜高密度化と塗布量の均一化を研究し、刃先の広範囲かつ均一な成膜方法を研究してきた。川下ユーザー企業の試験では工具寿命が10倍に達する値が得られた。

1)ドープ粉末の精密分級

図6にドープ粉末を精密分級し、超硬チップで塗布した表面を示す。図6(a)より精密分級する前は、 満遍なく、ドープ粉末で塗布されていることが解る。図6(b)より精密分級した後は、超硬チップの表 面を観察した。これにより、ドープ粉末の精密分級に成功したことが解る。



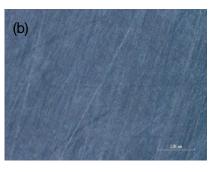


表 2 ドープ粉末の粒

	粒径 [μm]
(a)	1.0~10
(b)	0.05~1.0

図6 ドープ粉末を塗布した超硬チップ表面

②超長寿命化加工実験

ドープ粉末を塗布した超硬チップの刃先を超長寿命化加工した後、切削加工した刃先の表面を実体 顕微鏡で観察した。図 7 より切削加工した超硬チップの表面は、大きく欠けていた。刃先は摩耗する ことなく、切削加工中に突然欠けた。成膜により刃先の硬度が向上し、摩耗することなく欠けたと考 える。これにより、成膜により超硬チップの硬度化を実現した。





表3 超硬チップの表面

(a)	すくい面
(p)	逃げ面

図7 切削加工した後の超硬チップ刃先の表面観察

2-1-3 3次元形状刃エッジ部への成膜の可能性の検討および工具母材への元素拡散層形成による強活着法の研究

先行研究の工具材料開発で単結晶製造技術より派生させた新規の異材混入技術により従来の工具材料(炭化タングステンを主材料にしたもの)に対し、切れ刃部分の焼結材料の粒子間に高硬度材料を拡散混入させ、切削工具の強度(切削長の増加:長寿命化)を向上させた。

(1)超硬工具のビッカース硬さ

超長寿命化加工した超硬工具のビッカース硬さを測定するために試料を作製した。試料は三菱マテリアル製 DNGA150404 HTi10 である。図8に示す超硬チップを幅1 mm で切断した。

ホイールは厚さ 0.3mm で電着ダイヤモンドを用いた。同じ型番の超硬チップにおいても、電着ダイヤモンドホイール刃先の摩耗速度が異なった。比較するために、2 種類の試料(試料1)、試料2)を用意した。試料2は、電着ダイヤモンドホイールの摩耗速度が試料①比べ速かった。これにより、試料2は試料1)より硬く、摩耗しにくいことが解る。既存研究で開発した砥石を用いて試料の表面を仕上げて、図9のように半分を超長寿命化加工し、ビッカース硬さを測定した。測定条件は 9807N(HV1)、15 秒圧力をかけた。測定した結果を表4にまとめた。カタログより超硬チップのビッカース硬さは 1,700HV である。表4 (超硬チップのビッカース硬さ)より CMP 加工するだけで試料1、試料2共にカタログ値よりビッカースの値が大きくなった。試料2の CMP 加工表面は、試料1に比べてビッカース硬さの値が大きくなった。また、超長寿命化加工した表面のビッカース硬さの値が大きくなり、超長寿命化加工の効果で超硬チップが硬くなることが解った。測定箇所によるビッカース硬さのばらつきが大きかった。本研究で得られたビッカース硬さの向上は 1.2 倍であった。ビッカース硬さ試験はバルクの均一な硬度を測定するものである。ダイヤモンド圧子が侵入する深さは、超長寿命化加工による物性改質深さを超えていると考える。超長寿命化加工による「硬さ」に対する評価はビッカース硬さ試験では困難と考える。





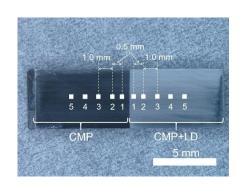


図9 超硬チップのビッカース硬さの測定管所

表4 超硬チップのビッカース硬さ

	試料① [HV]		<u></u>	料② [HV]
\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\\				
測定箇所	(CMP)	(CMP+超長	(CMP)	(CMP+超長寿命
		寿命化加工)		化加工)
1	1,822	2,056	1,911	2,018
2	1,801	1,993	1,854	2,109
3	1,719	1,994	1,855	1,865
4	1,812	2,108	1,877	1,934
5	1,844	1,899	1,788	1,957

②超長寿命化加工+CMP した超硬工具の切削加工試験

表5より CMP+超長寿命化加工した超硬工具の切削加工試験では、Inconel718 の切削距離が 10 倍以上となった。この結果から超長寿命化加工の効果は硬度と靭性を向上する効果があり、工具寿命が延び、切削距離が延びたと考える。

表5 切削加工試験の結果

インサート型式	刃部加工	被削材	ΦA [mm]	切削速度 [mm/min]	結果 (切削可能距離) [m]
	無し	Inconel718	29	36442	437 (基準)
	鋭利化刃先 (No.22A)	Inconel718	29	36442 10倍以 」	875 2倍
三菱マテリアル DNGA150404 HiT10	鋭利化+長寿命化	Inconel718	28	35186	4222以上
20	無し	Ti-6AL-4V	25	31416	754 (基準)
	Nano-Edge (No.19A)	Ti-6AL-4V	25	31416	2262 23倍

2-2 CMP 砥石形状の最適化及び加工条件の定量化(実施期間:名古屋工業大学)

既存研究で粗削り用として開発した砥石を用いて、超硬チップの研磨を行った。使用した超硬チップは京セラ製 DOGW11T3O4 KW1Oである。研磨前後の超硬チップの刃先を走査型電子顕微鏡 (SEM)で観察した。図1O(a)より研磨前では、表面の凹凸が激しく、バインダであるCo層も観察できる。図1O(b)より研磨後では、鋭利化で、滑らかな表面を実現した。また、WCの粒界が観察でき、結晶粒を保ったまま平坦になっていることが解る。これにより、粗削り用の開発した砥石だけでも刃 先エッジの鋭利な刃物を実現した。

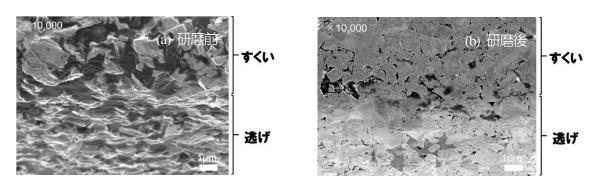


図10 SEMによる研磨前後の超硬チップの表面観察

2-2-1 工具刃先エッジ部を構成するすくい面とにげ面に CMP 加工を行い鋭利化できる加工条件の研究 超長寿命化加工成膜 CMP: 成膜面の最適 CMP 加工条件の研究

CMP 加工の研究では、より効率的且つ高精度で行うべく加工条件の研究を進め、砥石の揺動運動と チップ旋回運動を同期させ、チップの旋回位置と砥粒層位置を常に同じにする加工方法を発見した。 その結果、一部の工具形状において目標としていた従来工具に対し 1/10(5μ m \Rightarrow 0. 5μ m)の鋭利 化が実現できた。

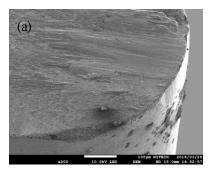
2-2-2 超長寿命化加工成膜面の CMP 加工の研究及び CMP 砥石形状の最適化及び有効 CMP 元素の研究

先行研究で超硬工具の主材料であるWCを変質することなく、工具刃先の鋭利化を実現する研磨技術 CMP 法を開発した。その技術を応用し、刃先丸みを従来の1/10以下(0.5 μm 以下)の鋭利化を実現し、切削抵抗を減少させ切削温度を抑制する。これにより切削時の化学反応を最小に抑えることで耐熱合金等の難削材料の切削加工において問題を改善する。

これまで開発した CMP 砥石では刃先の欠け、スクラッチが残留するため、これを効果的に除去す

る研究を実施した。また、超音波研磨装置を用いた研磨時間の短縮に取り組んだ。

開発した CMP 砥石を用いて超硬チップの刃先を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した。図11(a) より表面の凸凹が激しく、刃先を欠けていることが解る。図11(b)より切削痕が除去でき、表面が平坦になっている。しかし、刃先の欠け、スクラッチが残留している。開発した CMP 砥石だけでは深いスクラッチを除去することは困難で、研磨時間がかかり事業化には向いていない。そこで、粗削りの砥石を開発し、表面の凹凸と深い潜傷をなくすことを検証した。



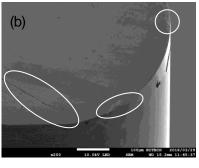


表6 超硬チップの状態

(a)	加工前(市販チップ)
(p)	CMP加工後

図11 SEMによるCMP加工前後の超硬チップ刃先の表面観察

従来工具に対し刃先丸みを 1/10 ($5\mu m \Rightarrow 0.5\mu m$) の鋭利化が実現できた。

チップの加工時間(当初実績)120分⇒15分へ短縮した。

作製した粗削り用砥石を研磨装置に装着し、超硬チップを仕上げた。研磨時間はすくい面と逃げ面、各2分行った。荒削りした超硬チップを実体顕微鏡で観察(図 12)した。すくい面、逃げ面共に切削痕の除去ができた。また、この表面から開発した CMP 砥石を用いて研磨することで研磨の時間短縮を実現することが出来た。

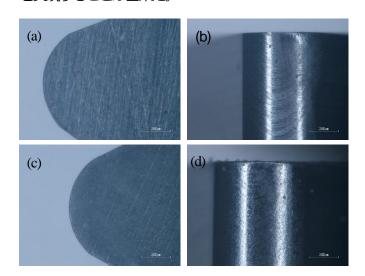


表7 加工した前後超硬チップ

(a)	to Table	すくい面
(p)	加工前	逃げ面
(C)	加工後	すくい面
(d)	加工技	逃げ面

図12 粗削り用砥石を用いた超硬チップ刃先の表面観察

2-2-3 成膜面の CMP 加工の研究及び CMP 砥石形状の最適化、加工時間短縮のための研究 先行研究で超硬工具の主材料である WC を変質することなく、工具刃先の鋭利化を実現する研磨技 術 CMP 法を開発した。その技術を応用し、刃先丸みを従来の 1/10 以下(0.5 µm 以下)の鋭利化を 実現し、切削抵抗を減少させ切削温度を抑制する。これにより切削時の化学反応を最小に抑えること で耐熱合金等の難削材料の切削加工において問題を改善した。

既存研究で開発した CMP 砥石だけでは、ダイヤモンド砥石による超硬工具の刃先形状時に導入した潜傷の除去を短時間に仕上げることを含めて難しい。そこで、本実験は既存研究で粗削り用として開発した砥石を用いて、超硬チップの研磨を行った。既存研究で開発した粗削り用の砥石を改良して、最終仕上げを目標に実験を行った。

超硬チップでは、既存研究で開発した砥石による CMP 加工の鋭利化と LD 処理による工具の長寿命化を実現した。今後は CMP 加工も含め、超長寿命化加工手法を用いた協働ロボットによるエンドミル刃先を仕上げる自動化を目指す。

既存研究で粗削り用として開発した砥石を用いて、超硬チップの研磨を行った。使用した超硬チップは京セラ製 DOGW11T3O4 KW1Oである。研磨前後の超硬チップの刃先を走査型電子顕微鏡 (SEM)で観察した。図13(a)より研磨前では、表面の凹凸が激しく、バインダであるCo層も観察できる。図13(b)より研磨後では、鋭利化で、滑らかな表面を実現した。また、WCの粒界が観察でき、結晶粒を保ったまま平坦になっていることが解る。これにより、粗削り用の開発した砥石だけでも刃 先エッジの鋭利な刃物を実現した。

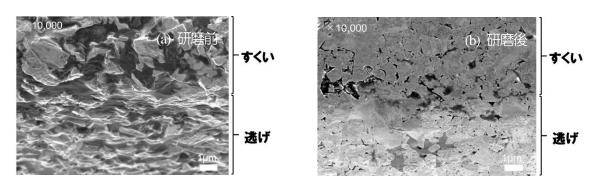


図13 SEMによる研磨前後の超硬チップの表面観察

3-3 工具形状開発及び材料改善(実施機関: CKK 株式会社)

3-3-1 難削材の高能率加工を実現する工具形状の研究

耐熱合金等の切削加工によって発生する加工歪みを最小にする高能率・高精度加工を実現する工具形状を開発した。工具形状を変化させ、切削時の振動を抑制し、ねじれ角やすくい角などを調整し切削性の良い形状を開発した。この研究は航空機部品の高品位、高精度、長寿命化を実現し、安全性の高い製品供給を目的としたものである。

工具形状の研究では、川下ユーザー企業において、現在量産加工に使用している工具を評価の基準として本研究の成果を見える形とするため、工具形状の選定と設計を行った。対象は、 φ16アルミ加工用ラジアスエンドミル、 φ20アルミ加工用ラジアスエンドミル、 φ16Ti加工用ドリルを選定し、試作品を製作した。

耐熱合金等の切削加工によって発生する加工歪みを最小にでき、高能率・高精度加工を実現する工 具形状を設計した。工具形状を変化させ、切削時の振動を抑制し、ねじれ角やすくい角などを調整し 切削性の良い形状を開発した。

①アルミ合金加工用エンドミルの開発 ② チタン合金加工用エンドミルの開発

3-3-2 ① 3次元超長寿命化加工方法の実施研究と装置開発(工具刃先の強化改善 超長寿命化 加工の研究で開発された加工をエンドミル等の 3次元形状に施すための方法を研究した。)と② 3次元 CMP 加工方法の実施研究と装置開発(CMP 加工条件の研究において開発された CMP 加工条件でエンドミル等の 3次元形状に CMP 加工を施す方法を研究した。)

導入した機械では、通常研磨で振れを従来の 1/5 程度に抑制した 3次元形状の工具が製作可能となった。これにより、3次元形状に対する CMP、超長寿命化加工時間の短縮が期待できる。

(1)難削材料用工具の最適形状の研究

ロングドリルの先端の振れは既存の研削盤ではシャンク基準で0.02mm程度発生していたが、振れを0.004mm(従来比 1/5)に抑制したロングドリル(図 1 4)の開発をした。

CMP 砥石での取り代は極僅かであるため、工具そのものの精度を上げることが CMP 加工の時間短縮と均一な加工に影響する。振れ幅 1/5 にしたことにより量産化時は加工に要する時間を 50%短縮できると期待できる。

超長寿命化加工についても工具自体の振れを抑制することで、加工範囲を狭めることが可能なため

加工時間の短縮が期待できる。



図14 ロングドリル

②工具材料の改善研究

既存の超硬チップをCMP加工すると、工具の表面に空隙があることが確認できた(図15)。空隙は超硬素材に含まれるバインダである可能性があり、バインダレスの超硬を選定した。CMP加工後の材質の表面は均質で、被削材の切削面精度の向上と工具のチッピングが発生し難くなることが期待できる。バインダレスの超硬チップは市販されておらず、試作品は作成(図16、17)したが量産には課題がある。



図15 市販超硬チップ CMP後



図16 試作したバインダレス超硬チップ

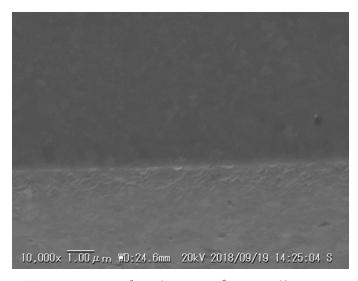


図17 バインダレス超硬チップ CMP後

2-2-3 ①3次元超長寿命化加工方法の実施研究と装置開発(工具刃先の強化改善 超長寿命化 加工の研究で開発されるドーピング元素をエンドミル等の3次元形状に施すための方法を研究しその機械装置を開発する。)と②3次元 CMP 加工方法の実施研究と装置開発(CMP 加工条件の研究で開発された CMP 加工条件でエンドミル等の3次元形状に CMP 加工を施すための方法を研究しその機械装置を開発する。)

(1) 3次元超長寿命化加工方法の実施研究と装置開発

耐熱合金等の切削加工によって発生する加工歪を最小にでき、高能率・高精度加工を実現する工具 形状を開発した。

工具形状を変化させ、切削時の振動を抑制し、ねじれ角やすくい角などを調整し切削性の良い形状を最適化した。この研究により航空機部品の高品位、高精度、長寿命化を実現し、安全性の高い製品供給を目的としたものである。

導入した検査測定機は、ダイヤモンド砥石で通常工具を製作した後に1 μ レベルの精度を正確 に測定するために使用する。次工程のCMPは2~3 μ のみ研磨するため、元となる工具の正確 な計測ができていないと加工できない問題があったが解消した。

また、工具刃先の状態を視覚的に観察できるSEMと数値化できるレーザー顕微鏡(図18) を用いて研究内容の見える化をするとともに研磨時間の短縮ができた。

並行して単純形状であるチップを量産化できるよう機械装置の開発を行い、設計図が完成した。

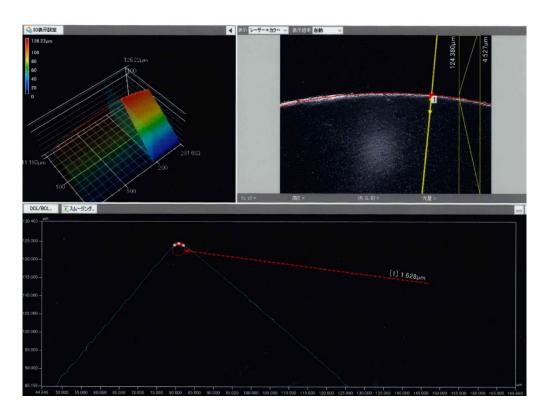


図18 レーザー顕微鏡による工具刃先の測定

②3次元 CMP 加工方法の実施研究と装置開発

3次元 CMP 加工方法の実施研究と装置開発では試作機が完成し、目的の加工ができることが確認できた。CMP加工を3次元工具に行うため、CMP加工前の工具形状を正確に把握し最小研磨量で次工程のCMPをするプロセスの開発をした。

研磨前の刃先状態をレーザー顕微鏡で解析して必要研磨量を数値で把握し、CMPの加工量を最小 化するプロセスの開発をした。

旋盤による評価試験ができる体制が整い、開発スピードが上がる見込みとなった。導入した機械では、CMPの量産化を視野に CMP 加工時間の短縮が可能となる測定機を導入した。 CMP 加工前の工具の形状を測定する検査測定機と研磨量を数値的に把握できるレーザー顕微鏡により正確に速く加工できるプロセスを確立した。

CMP加工条件の研究で開発された CMP 加工条件で、エンドミル等の 3 次元形状に CMP 加工を施すための方法を研究しその機械装置を開発した。これにより切込量 1 μ 以内が可能となり、量産化に向け大きく前進した。

2-4 切削テストによる最良切削条件の研究及び材料解析(実施機関:大同大学)

2-4-1 実切削による切削抵抗及び摩耗量の測定の研究

実切削による切削抵抗及び摩耗量を測定し難削材の最適切削条件を見出した。

最適切削条件の研究として、エンドミル工具3本(ϕ 6、 ϕ 8、 ϕ 10)を使用して難削材 Ti 合金(Ti -6Al-4V)に対しトラバース加工をし、加工後の仕上げ面に残る切れ刃の転写精度を未使用状態の刃先形状と比較した。

実切削による切削抵抗及び摩耗量を測定し難削材の最適切削条件を見出した。

実切削による切削抵抗及び摩耗量の測定の研究を行い、次にあげる3点の切削特性を見出すことができた。

- ・切削方式で転写精度を比較した場合、Up cut 法は Down cut 法に比べて工具切れ刃の転写精度が高い。
- ・工具径が大きい場合、切れ刃の転写精度は Down cut 法の方が大きくなる。
- ・工具径が小さい場合、送り量の影響は小さい。
- 4-4-2 被削材の切削表面粗さと表面応力を測定し表面性状を解析及び被削材の内部応力の測定 方法の確立

加えて被削材の切削表面粗さと表面応力を測定し表面性状を解析及び被削材の内部応力の測定方法を確立した。

①最適切削条件の研究

CMP 未処理のエンドミル工具を使っての切削条件の評価が完了しCMP 工具に対する基礎的切削条件が構築できた。併せて CMP 処理旋削工具による仕上げ面への工具転写精度評価試験を一部ではあるが実施した。

超硬材にCMP処理した旋削用工具とラジアスエンドミル工具、それに比較工具として同形状の市販工具を使い、Ti合金(6AI-4V)、AI合金系(AI2O17,AI7O75),アクリル樹脂を被削材料として設定しCMP工具の特性を市販工具と比較する方法で開発工具に対する最適切削条件を見出す。特性評価は工具切れ刃稜の損耗状態、構成刃先の有無、仕上げ面あらさを調べ、切削速度(V)、送り速度(f)、切込み量(d)の切削条件との関係から解析を試みた。

[評価結果]: Ti-6Al-4V 材に対するラジアス型エンドミル工具

設定条件では: 工具径(Φ): 6(mm),8(mm)でチッピングが大きい

工具直径(Φ): 10(mm)では安定した工具摩耗状態である

切削速度(V):60(m/min)で工具摩耗が小さい

CMP 未処理のエンドミル工具を使っての切削条件の評価が完了しCMP 工具に対する基礎的切削条件が構築できた。

②表面形状解析研究

エンドミル工具と CMP 処理旋削工具に対する表面性状を解析した。

加工後の仕上げ面性状に対して触診式あらさ計と非接触型レーザー形状則定機を使い解析を試みた。 なおアクリル樹脂材に対してはレーザー光の透過問題が懸念される為、光拡散に対する処理方法が 確定するまで、得られた結果は参考資料とした。

その成果として、被削材への工具切れ刃形状の転写精度は切削条件に支配される。ラジアス型工具は、切れ刃損傷を回避するには送り速度を低くする。旋削工具は、高分子樹脂系材料(アクリル)に対して転写精度が低くなる。また工具との親和性が高いTi系材料でも切削条件を選択する事で高い転写精度が得られる。

③内部 応力の 解析研究

エンドミル工具を使い切削条件を固定する方法で被削材料をパラメータに取り切削抵抗力を測定した。

最適切削条件の確立後、切削動力計を使い3分力方向の抵抗力を求め、生成される切りくず厚さを計測する方法で、切りくず生成時のせん断領域での材料挙動と工具すくい面上における切りくず状態をせん断角、せん断抵抗力、すくい面摩擦力などの力学的挙動を、塑性力学的に解析を試みた。平行して切削急停止装置を使い切りくず生成状態を固定させる方法でサンプリングした被削材料の組織の塑性流動状態をSEM、EDX、分子間顕微鏡等を使い詳細な解析を試みた。

これらの実験結果を元に解析実験に対する切削条件を整備できた。

4-4-3 難削材の最適切削条件、材料歪の解析

開発されたCMP加工を使い作製した旋削用超硬スローアウェイ型チップに対して切れ刃形状精度と表面性状を詳細に調査した。解析に当たっては、電子顕微鏡(SEM)による工具すくい面を高倍率観察し合わせて工具すくい面表面の電子線分析(EDX)を行い詳細に解析した。

開発したCMP 研磨法で作製した旋削用超硬チップは市販品に比べて、切れ刃を構成する稜線部での曲率半径が極めて小さくなる事を本解析より確認した。また工具製作時に発生する擦過痕が小さく凹凸を小さくする機能が有る事を確認した。提案する新 CMP 法の機能と効果について第3者的視点で明らかにしたことは意義のあるものと言える。

第3章 総括

3-1 研究開発成果

長寿命化技術に関して、市販の工具材料(炭化タングステンを主材料にしたもの)に、切れ刃部分の焼結材料の粒子間に高硬度材料を拡散混入させ、切削工具の強度を向上させることができた。また、ドリル・エンドミルの様な3次元工具に対しても短時間で効果が出る超長寿命化加工方法を開発した。 CMP技術に関して、市販の工具材料に(炭化タングステンを主材料にしたもの)にCMP加工をし、CMP加工前は約 5μ mあった刃先丸みを1/10の 0.5μ mに鋭利化できた。加工時間には研究当初 120分かかっていたが、15分に短縮できた。

超長寿命化加工、CMP共に自動化設備の試作機は完成し、目的の加工ができることが確認できた。

本研究の最大の目的であった被削材の材料歪の抑制に関して、旋削テストの結果から切削抵抗が減少することにより被削材の発熱が抑えられ材料歪は減少したと推測できる。また、刃先の鋭利化により加工精度が向上することが分かった。工業製品の更なる高精度化が期待できる。

3-2 研究開発後の課題

既に量産化技術の開発に取り組んでいるが、需要見込みは大きく更なる加工技術の効率化により需要に応えられる供給体制をとることが課題である。また、被削材の種類により最適な超長寿命化加工、CMPの方法は異なり、それに応じた加工方法を定量化し品質の安定させることが課題である。

3-3 事業化展開について

【研究開発成果に係る製品等】

耐熱合金用超長寿命化加工-CMP 旋削用チップ、アルミ合金用超長寿命化加工-CMP エンドミル、チタン合金用超長寿命化加工-CMP エンドミル、および既に市場に出ている切削工具に対する再研削

【その他波及効果】

本研究で開発する超長寿命化加工-CMP加工法は従来工具の刃先処理(再研削)にも適用できる。 工具材料のWCやCoは希少金属である事から、再利用技術として摩耗した工具刃先を再研削によっ て蘇らせる。この再研削時に超長寿命化加工-CMP加工法を使用することで本研究による工具性能向 上を付加できる。現在、工具再研削は切削加工分野で使用される50%以上の切削工具に対し行われて

おり、その波及効果は大きい。

他の産業分野別に期待される効果として下記に記す。

(自動車産業)

ハイブリッド、電気自動車、燃料電池車などの電動化だけではなく、自動運転を可能にするスマートカー技術の台頭により、車載用電子部品の需要が拡大する。このような電子部品は純鉄+SUS 材や純銅+重金属などのハイブリッド材料であるため加工が難しいが、本開発工具の使用により、加工精度向上に加え、加工時間短縮が可能になる。さらに構造部品の軽量化に用いられる CFRP 等も切削抵抗低減によるバリレス加工を実現する。

(エネルギー産業)

火力、風力発電等ではブレード加工などの大きな需要が有り、SUS等の靱性が強化された難削材料を加工するため、高能率な切削加工が必要とされている。本研究で開発される切削工具は切削抵抗低減による低振動加工で従来工具の2倍以上の高能率に加工出来ることで需要に繋がる。

【新たな事業展開の可能性】

- ・航空機部品の将来的なネットシェイプ化の要望に対しても加工時に必要となる恒温鍛造用金型部品の強度や耐久性が大幅に向上する加工が可能になる。
- ・3次元形状工具のLD-CMP装置を開発し製品化する。

【想定する国内、海外市場(現状、今後の動向)】

航空機部品の安全性が重視され、本研究で開発した超長寿命化加工 -CMP 工具の必要性が増すこと、また、自動車等のセンサー部品の精度向上が求められ、部品材料のハイブリッド化に伴い、本工具が使用されることに期待をしている。更に今後、エネルギー産業が発展し、その部品加工にも本工具が使用させることが予想される。

【販売先、川下製造業者等の事業化の体制】

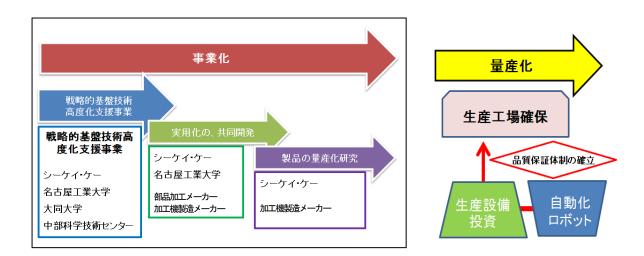


図19 事業化のマップ

本研究で添加元素とWC 粒を CMP 加工出来る技術を開発し刃先材料の改善と鋭利化を実現できれば、工具寿命延長に加え、切削面に歪(変質層)を残さない加工が可能になる。先行研究で CMP 加工技術を確立しており、現実性がある。また、本事業の提案企業であるシー・ケィ・ケー(株)はグループで年間 200 万本(32 億円以上)の切削工具生産能力があり、毎年の設備投資により機械設備にも生産余力がある。実用化になるまで、川下ユーザー企業との共同開発契約を結ぶ事になっており、開発品は川下ユーザー企業で使用する。また、製造する超長寿命化加工-CMP 加工機は、量産を目指してロボット制御による自動機を開発する。

最終的には、約30万本の工具生産が出来る体制として、①生産工場確保(含外注) 【インフラ】、②生産設備(超長寿命化加工-CMP) 構築【製造設備】、③品質保証体制【トレーサビリティ】を構築する。

以上