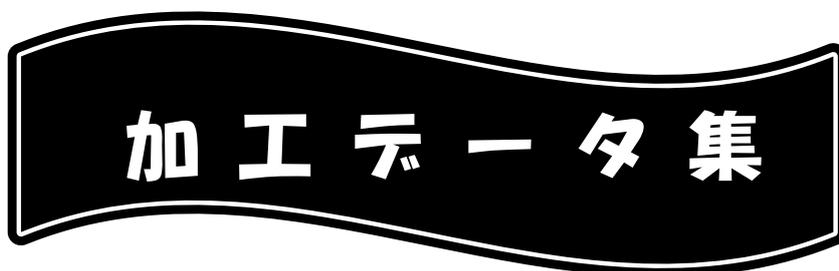


東北経済産業局

平成24年度次世代ものづくり基盤加工技術調査事業

次世代ものづくり基盤加工技術調査



協力機関名

(地独) 青森県産業技術センター 八戸地域研究所

(地独) 岩手県工業技術センター

秋田県産業技術センター

宮城県産業技術総合センター

山形県工業技術センター

福島県ハイテクプラザ

東北大学 大学院 工学研究科

(独) 産業技術総合研究所 東北センター

東北経済産業局

委託先: 財団法人 青葉工学会

目 次

1. 調査の目的、内容	2
2. 次世代ものづくり基盤加工技術調査の概要	5
3. (調査結果)	
析出硬化系ステンレス鋼の切削加工技術 ((地独) 青森県産業技術センター 八戸地域研究所)	10
構造用非鉄合金の切削加工 ((地独) 岩手県工業技術センター)	28
複合材料 (CFRP) 及び耐熱合金の切削加工技術 (秋田県産業技術センター)	41
次世代高度電子機械産業で使われる素材の加工技術開発 サブテーマ1：無酸素銅の切削加工技術 サブテーマ2：単結晶SiCの研削加工技術 (宮城県産業技術総合センター)	52
超硬合金の切削加工技術 (山形県工業技術センター)	69
チタン・チタン合金の小径ドリル加工 (福島県ハイテクプラザ)	89

1. 調査目的、内容

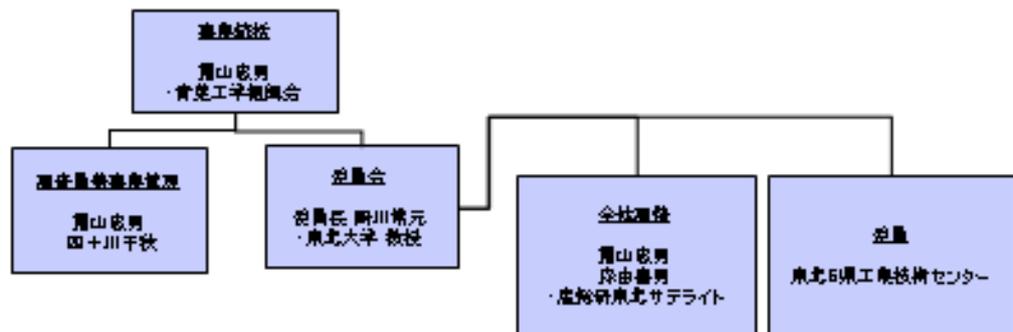
- 今後の自動車産業、航空機産業及び半導体産業等では、次世代のものづくりにおける新材料や難削材料の採用が活発化されることが予想される。例えば、複合材料の採用による軽量化、耐熱向上を目指したセラミックスパワー半導体など、東北地域では一般化されていない材料である。
- 上記の産業の東北地域での発展に伴い、地域のサポーティングインダストリーを担う企業（以下、「地域サポイン企業」という。）には、従来では経験のない材料に係る加工依頼が発生することが予想される。
- 一方、加工条件の探索には、各企業が個々に事例を収集し、試行錯誤を経て条件を決定しており、膨大な手間と時間を要している。
- 地域サポイン企業では事例収集にあたり、論文や技術報告書などを参考にしているが記載上の条件で加工を行なってもそのとおりにならないことが多い。
- 地域サポイン企業における機械装置の条件や加工者の特性などがあり、条件探索の記載だけでは伝えきれない領域があるということが認識される。
- 今回の調査は今後、必要となる次世代のものづくりに必要な新材料や難削材料の加工や製造に係る加工技術調査を地域の大学及び公設研が連携して実施することにより、地域サポイン企業の国際競争力強化を、図ることを目的としたものとする。
- 東北6県における対象品の選定及び調査については、各6県の公設研の技術職員と連携して行うこととする。
- これらの6県公設研の活用を効率的にするため、技術的な内容の統括について東北大学の専門家を招聘し、内容の調整を図る。
- 大学及び公設研などのアカデミアで対象となっていない領域について、地域産学官で協議・決定し、かつ、産業界のニーズが高い領域について、東北大学と東北6県公設研の専門家で次世代のものづくりに係る加工データを調査する。
- 対象とする技術領域は、自動車産業や半導体産業に欠かせない切削・研削領域とする。
- 将来像として、本報告書を参考とした条件探索を行う地域サポイン企業が、「記載だけでは伝えきれない領域」＝「実際の感触」についての指導を希望する際は、まさに公設研の技術職員がフェースtoフェースで指導することが可能であり、技術データにモノ・人両面でアクセスフルな地域の強みを活かした取り組みのきっかけとなるものを目指す。

平成24年度次世代ものづくり基盤加工技術調査に係る調査イメージ



【実施体制・役割分担】

- ・ 業務実施体制 受託機関:財団法人青葉工学会



- ・ 役割分担
 - ▶ 事業統括: 本調査事業の全体を統括する。
 - ▶ 調査員: 本事業における調査項目について調査する。報告書を作成する。
 - ▶ 委員会: 調査対象物や調査方法を検討し決定する。また、調査データに対する分析・検討を行う。
 - ▶ 委員会における全体調査: 委員会運営を円滑に行うため、委員長を補佐し5県工業技術センターに対する資料提出様式などを専門的な知識により取りまとめる。

<委員会メンバー>

機 関 名	氏 名	役 職	備 考 (E-mail)
東北大学大学院工学研究科	厨川常元	教授	委員長
(地独) 青森県産業技術センター 八戸地域研究所	中居 久明	主任研究員	hisaaki_nakai@ao mori-itc.or.jp
(地独) 岩手県工業技術センター	飯村 崇	主査専門研究員	t-iimu@pref.iwat e.jp
秋田県産業技術センター	加藤 勝	主任研究員	masaru@rdc.pref. akita.jp
宮城県産業技術総合センター	渡邊 洋一	副主任研究員	watanabe-yo436@p ref.miyagi.jp
	齋藤 佳史	研究員	saito-yo911@pref .miyagi.jp
	久田 哲弥	副主任研究員	hisada-te954@pre f.miyagi.jp
山形県工業技術センター	江端 潔	主任専門研究員	ebatak@pref.yama gata.jp
	村岡 潤一	研究員	muraokaj@pref.ya magata.jp
福島県ハイテクプラザ	吉田 智	専門研究員	yoshita_satoshi_ 01@pref.fukushim a.jp
(独) 産総研 東北サテライト	森 由喜男	招聘研究員	y-mori@aist.go.j p
経済産業省東北経済産業局 地域経済部 産業技術課	油川 一義	課長補佐	オブザーバー
	齋藤 美和	総括係長	オブザーバー
	百目鬼 行弘	係長	オブザーバー

○次世代ものづくり基盤加工技術調査の概要

公設研名： (地独)青森県産業技術センター八戸地域研究所

テーマ： 析出硬化系ステンレス鋼の切削加工技術

選定材料： 15-5ph

結 言

本調査により以下のことが明らかになった。

- (1) 工具形状 SM(切刃形状 95° , 刃先角 80° , すくい角 10° , ノーズ R0.4mm) で 15-5PH と SUS304 の切削加工を行い、比較を行った。理論仕上げ面粗さ R_z に対する表面粗さ R_z の比 (R_z/R_{zth}) はほぼ同等であることが分かった。また、SUS304 は切込量と送りが大きくなるとビビリ振動が発生したが、15-5PH はビビリ振動の痕は見られなかった。工具摩耗についてはほぼ同等であった。
- (2) 工具形状 (ブレーカ) 別および切刃形状別で 15-5PH の切削加工特性を調べた。工具形状別では SA (切刃形状 95° , 刃先角 80° , すくい角 6° , ノーズ R0.4mm) において R_z/R_{zth} が小さく、⑥TSF (切刃形状 95° , 刃先角 80° , すくい角 18° , ノーズ R0.4mm) において切りくずの排出性が良いことが分かった。切刃形状別では⑩切刃 93° (切刃形状 93° , 刃先角 55° , すくい角 10° , ノーズ R0.8mm) において表面粗さ R_a が小さく、⑨ 75° (切刃形状 75° , 刃先角 90° , すくい角 10° , ノーズ R0.8mm) において切りくずの排出性が良いことが分かった。

公設研名： (地独) 岩手県工業技術センター

テーマ： 構造用非鉄合金の切削加工

選定材料： Co 合金&銅合金 (ベリリウム銅)

結 言

本調査により以下のことが明らかとなった。

- (1) 株式会社エイワ製のいわて発 CCM 合金の加工には、焼き入れ鋼用のエンドミルを使用する必要がある。これは、従来の CCM 合金と比べ高い硬度を有するためであると考えられる。また、あえて汎用工具で加工する場合には、CrN のコーティングの様に、耐凝着性を高めたエンドミルを選択すると良い。ただし、ダイヤモンドや DLC は Cr との化学反応が原因と思われる摩耗が進むため適さない。折損は全てアップカットの際に起こっており、取り代が大きい場合は CCM 合金加工における工具寿命を考えると、アップカットを極力避けた方が良いと考えられる。
- (2) CCM 合金の表面をボールエンドミルで仕上げる場合、目視では R1.0mm~2.0mm が、粗さの数値では R2.0mm 以上が適しており、必要とされる機能に応じて使い

分けると良い。

- (3)ベリリウム銅の加工においては、今回の実験では加工量が少なくコーティングの違いによる差を確認するには至らなかった。今後追加で確認を行っていく予定である。

公設研名： 秋田県産業技術センター

テーマ： 複合材料（CFRP）及び耐熱合金の切削加工技術

選定材料： CFRP（エンドミル加工）&ハステロイ（穴あけ加工）

結 言

本調査により以下のことが明らかになった。

○CFRP 材のトリム加工について

- (1) CFRP 材のトリム加工では、工具寿命や加工品位の観点から、超硬母材のダイヤモンドコーティング工具の使用を推奨する。超硬及び DLC コーティング工具でもトリム加工は可能であるが、直ぐにバリ等が生じる可能性が高い。また、ハイス母材コーティング工具は不適である。
- (2) ダイヤモンドコーティング工具では、一般的にルータータイプは荒加工向け、エンドミルタイプは仕上げ加工向けと言われているが、仕上げ面粗さに明確な差は見られないものもある。また、ダイヤモンドコーティングの膜厚が加工品質に影響する可能性が高いので、出来る限りシャープな切れ刃を有する超微粒・薄膜のダイヤモンドコーティングが良い。
- (3) ねじれ角の大きい工具は表面のバリやデラミネーション（層間剥離）を促進する可能性があるため、工具形状としては、ねじれ角の小さい多刃工具が有効であると考えられる。
- (4) 一概に CFRP 材と言っても多種多様である。工具メーカーが CFRP 加工用と推奨する工具でも、すべての CFRP 材に適するとは限らない。従って、テスト加工等を踏まえて工具選定することが望ましい。

○ハステロイ X の穴加工について

- (1) 工具材質としては、超硬ソリッドまたは超硬母材のコーティング工具の使用を推奨する。また、工具形状としては、シンニングを施したシャープな切れ刃を有する形状が良いと考えられる。
- (2) ハイス母材のコーティング工具は、コーティングの種類により使用可能なものもあるが、一般的には使用不可と判断できる。
- (3) 本実験で使用したセンタースルードリルは、切屑排出性は良かったが工具摩耗の抑制にはあまり効果が認められなかった。標準形状より価格が高い分、使い分けが必要であると考えられる。

公設研名： 宮城県産業技術総合センター

テーマ： 次世代高度電子機械産業で使われる素材の加工技術開発

サブテーマ1：無酸素銅の切削加工技術

サブテーマ2：単結晶SiCの研削加工技術

選定材料： 無酸素銅&単結晶SiC

結 言

○無酸素銅の切削加工については、市販工具（A、B、C）を使用し加工後の表面性状、表面粗さ、摩耗状態の調査を行い以下の知見が得られた。

- (1) 工具Aが他の工具と比較して加工表面状態が良好となる。
- (2) 切削液冷却方法による加工方法がオイルミスト冷却方法よりも鏡面に近い表面状態が得られる。
- (3) 表面粗さの最小値は工具Aを使用した場合で工具回転数20000、一刃送り量 $50\mu\text{m}$ 切削液での加工条件にて得られ、 $0.0121[\mu\text{m}]Ra$ を得た。
- (4) 工具のニゲ面摩耗幅は工具Cが最小となり摩耗幅の増加量も最小となった。

○単結晶SiCを様々な砥石で加工した本研究により以下のことが明らかになった。

- (1) 砥石SDC200N75BJ1による平面研削では、研削抵抗は砥石周速度1300m/minで法線及び接線方向ともに最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ $0.3\mu\text{m}Ra$ が得られる。破碎は砥石周速度1300m/minで最も少なくなった。
- (2) 砥石SD1000N75BL1による平面研削では、研削抵抗は砥石周速度1300m/minで法線方向が最大、接線方向は最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ $0.04\mu\text{m}Ra$ が得られる。破碎は砥石周速度1300m/minで最も少なくなった。
- (3) 砥石SD2000P100CRによる平面研削では、研削抵抗は砥石周速度1300m/minで法線方向が最大、接線方向は最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ $0.05\mu\text{m}Ra$ が得られる。破碎は砥石周速度1300m/minで最も少なくなった。
- (4) 砥石SD2000L50BL1による平面研削では、研削抵抗は砥石周速度1300m/minで法線及び接線方向とも最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ $0.03\mu\text{m}Ra$ が得られる。破碎は砥石周速度1300m/minで最も少なくなった。
- (5) 砥石SD5000P100CRによる平面研削では、研削抵抗は砥石周速度1300m/minで法線方向が最大、接線方向は最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ $0.02\mu\text{m}Ra$ が得られる。破碎は砥石周速度1300m/minで最も少なくなった。
- (6) 砥石SD5000L50BL1による平面研削では、研削抵抗は砥石周速度1000m/minで法線方向が最大、接線方向は最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ $0.01\mu\text{m}Ra$ が得られる。破碎は砥石周速度600m/minで最も少なくなった。

公設研名： 山形県工業技術センター

テーマ： 超硬合金の切削加工技術

選定材料： 超硬合金

結 言

【実験 1】では、超硬合金 VM-30 を被削材としたときの軸付電着ダイヤモンドストレー
ト砥石（以下、電着砥石）とダイヤモンドコーテッドラジアスエンドミル（以下、ダ
イヤコート工具）の適正ミーリング条件を、ツールパスごとに調べ、以下のことが明
らかになった。

- (1) 電着砥石での深切込み低送り溝加工では、研削液が研削点まで供給されにくく、
短時間でめっき層の剥離までに至ってしまう。φ4 電着砥石#100 では、軸方向切
込み深さ 3mm の溝を加工できなかった。
- (2) 一方、研削液の供給を改善したトロコイドパスでは、幅 4mm・深さ 3mm の溝を、
φ3 電着砥石#100 で加工することができる。そのときの加工条件は、側面加工の
適正条件から、研削のフライスモデルを用いて導出することができる。
- (3) ヘリカルパスにステップフィード（イニシャル点復帰）を組み合わせることで、
直径 5.5mm・深さ 3mm の止まり穴を、φ4 電着砥石#100 で加工することができる。
- (4) ダイヤコート工具で高能率に溝を加工するには、浅切込み高送りが有効である。
また、浅切込み低送りによって、溝底面を鏡面に仕上げることができる。φ2 工
具では 0.006 μmRa が、φ0.011 μmRa が得られた。ダイヤコート工具には研削液
ではなく、エアブローを使用する。
- (5) 工具のほぼ全幅で切削する溝加工では、すくい面と逃げ面のダイヤコートが割れ
て剥離し、工具寿命に至る。
- (6) 工作機械やツーリング、治具・取付具等の剛性が十分でない場合は、削り残しが
生じる。
- (7) ランピング時の送り速度を下げることで、ダイヤコート工具を損傷させることな
く、傾斜角度 0.1° または 0.2° で切り込みことができる。
- (8) 同様に送り速度を下げることで、ダイヤコート工具を損傷させることなく、ヘリ
カル加工ができる。このとき、ステップフィードなしでも工具径と同じ深さまで
連続加工できる。

【実験 2】では、VM-30 の適正加工条件のもと、φ2 ダイヤコート工具で多様な超硬合
金材種に溝を加工し、その被削性（切削抵抗、溝底面粗さ等）を比較し、以下のこと
が明らかになった。

- (1) WC 粒子の大きさが同じであれば、HRA 硬さが高いほうが切削抵抗も大きくなる傾
向がある。また、HRA 硬さが同程度であれば、WC 粒子が大きいほど切削抵抗が大
きい。

- (2) WC 粒子の大きい材種、特に VU-60 は、浅切込み低送り加工を施しても、粗さが向上しない。浅切込み低送りによる仕上げ加工が効果的なのは、比較的 WC 粒子が小さく、HRA 硬さが高い材種であり、それ以外の VC-30、VC-50、VM-50、VU-60 等に対しては、VM-30 の適正加工条件は適さない。

公設研名： 福島県ハイテクプラザ

テーマ： チタン・チタン合金の小径ドリル加工

選定材料： Ti 合金

結 言

チタン合金の小径ドリル加工実験を行った結果、次のことが分かった。

- (1) 小径深穴ドリルサイクル (G83) による穴加工では、送り速度 (送り量)、回転数 (切削速度) よりも、ステップフィード量の調整が加工時間短縮に効果的である。
- (2) 送り速度 (送り量) を上げると、切削時に切れ刃が被削材に接触しながら移動する長さが短くなり、摩耗量が減少する傾向が見られる。
- (3) 回転数 (切削速度) を上げると、切削時の刃先の温度上昇が大きくなり、摩耗量が大きくなる。
- (4) ステップフィード量を大きくすると、切り屑排出動作の回数が減り、切れ刃に圧着した切り屑の剥離による摩耗 (超硬合金粒子の脱落) が抑えられ、工具摩耗量が小さくなる。
- (5) チタン合金の穴加工では、蛇腹状の連続した切り屑が生じるため、ステップフィード量を大きくすると、工具形状によっては折損を生じやすくなる。

析出硬化系ステンレス鋼の切削加工技術

(地独)青森県産業技術センター八戸地域研究所 中居 久明

1. 緒言

近年、航空機市場は新興国における需要の増大、先進国における既存機の更新など中長期的に成長が見込まれている。航空機産業は部品点数が約300万点とも言われ、極めて裾野が広く、中小企業にとってもビジネスチャンスの期待が高まっている。本報では航空機産業で使用される析出硬化系ステンレス鋼15-5PHを取り上げ、切削特性の調査を行った。

2. 調査研究内容

2-1 実験方法

15-5PH はステンレス鋼の中で多く航空機材料として用いられており、C<0.07%、Ni4.5%、Cr15%、Cu3.5%が主成分の鉄であり、耐腐食性や疲労特性に優れ、低合金鋼の代替としても広く用いられている。15-5PHはJIS規格外の析出硬化型ステンレス鋼であり、航空機以外ではあまりなじみの無い金属材料である。15-5PHの加工特性を調べるため、旋盤による切削加工を行い、加工表面の観察と粗さ測定、切りくずの排出性、工具摩耗についてSUS304と比較を行った。また、工具形状による15-5PHの切削加工特性を調べた。

被削材の硬さを表1、旋削加工における加工条件を表2、使用した工具を表3に示す。工具材種はTiCNコーティング超硬工具に統一した。SUS304との比較には、当所でSUS304の切削に通常使用するブレーカ形状①SMタイプの工具を使用し、15-5PHの工具による加工性の調査にはすくい角と切刃形状の異なる10種類の工具を使用した。ヤマザキマザック(株)製CNC旋盤Quick Turn8を使用した。被削材の形状はφ50mm×150mm丸棒で、軸方向に切削を行った。加工表面の粗さ測定には東京精密(株)製表面粗さ測定装置surfcom1400Dを使用し、加工表面や工具の観察はオムロン(株)製デジタルマイクロスコープVC3000V2を使用した。

【表1 被削材の硬さ (HV)】

15-5PH	300
SUS304	160

【表2 旋削加工条件】

切削速度 (m/min)	100
送り (mm/rev)	0.2、0.25、0.3
切込量 (mm)	0.5、1.0、2.0、3.0
切削液	水溶性エマルジョン

2-2 実験結果

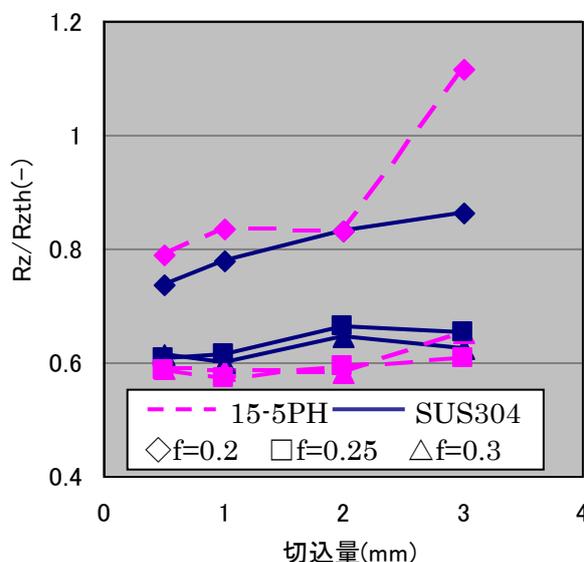
図1に切込量と送りを変えて15-5PHとSUS304を切削したときの表面粗さRzと理論仕上げ面粗さRzthの比を示す。理論仕上げ面粗さRzthの計算式を(1)式で表される。

$$Rzth = f^2 \times 1000 / (8r) \dots (1)$$

f: 送り (mm/rev)

r: 刃先ノーズ半径 (mm)

刃先ノーズ半径 r=0.4 の場合、送り f=0.2mm/rev で Rzth=12.5 μm、送り f=0.25mm/rev で Rzth=19.53 μm、送り f=0.3mm/rev で Rzth=28.13 μm である。Rz/Rzth は15-5PHの送り0.2 (mm/rev)、切込量3mm以外、理論値を下回る1以下であ



【図1 切込量と送りによる15-5PHとSUS304の表面粗さへの影響】

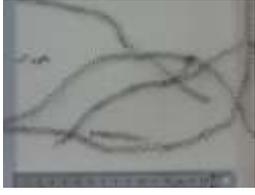
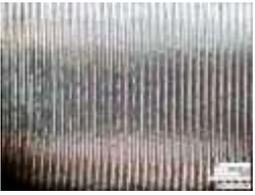
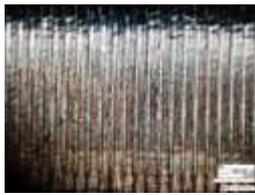
った。また、Rz/Rzthは15-5PHとSUS304ともほぼ同等であるが、送り0.2 (mm/rev) のとき大きい値を示していた。これは送りが小さいと被削材と工具の接触時間が長くなるため熱の影響があったのではないかと考えられる。

図2に工具①SMによる15-5PHの切りくず形状と加工表面状態、図3に工具①SMによるSUS304の切りくず形状と加工表面状態を示す。15-5PHにおいて切込量が0.5mmのものは切り屑が分断せず螺旋状に長く伸びており、切りくずの厚さが薄いため形状に安定性が無く工具への絡まりの原因になると考えられる。SUS304は全ての条件において切りくずが分断されており、排出性は良好であった。SUS304は切込量と送りが大きくなるとビビリ振動が発生したが、15-5PHはビビリ振動の痕は見られなかった。

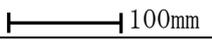
【表3 切削工具】

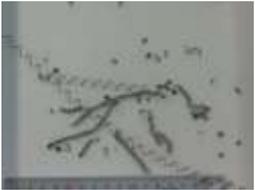
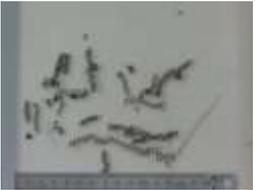
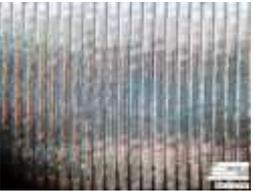
	①SM				
					
切刃形状	95°				
刃先角	80°				
すくい角	10°				
ノーズ R	0.4mm				
	②SA	③SS	④TM	⑤S	⑥TSF
					
切刃形状	95°				
刃先角	80°				
すくい角	6°	11°	13°	15°	18°
ノーズ R	0.4mm				
	⑦切刃 45°	⑧切刃 62°	⑨切刃 75°	⑩切刃 91°	⑪切刃 93°
					
切刃形状	45°	62.5°	75°	91°	93°
刃先角	90°	55°	90°	60°	55°
すくい角	10°				
ノーズ R	0.8mm				

スケール：  100mm

			送り(mm/rev)			
			0.2	0.25	0.3	
切りくず	切込量(mm)	0.5				
		1				
		2				
		3				
	加工表面	切込量(mm)	0.5			
			1			
			2			
			3			

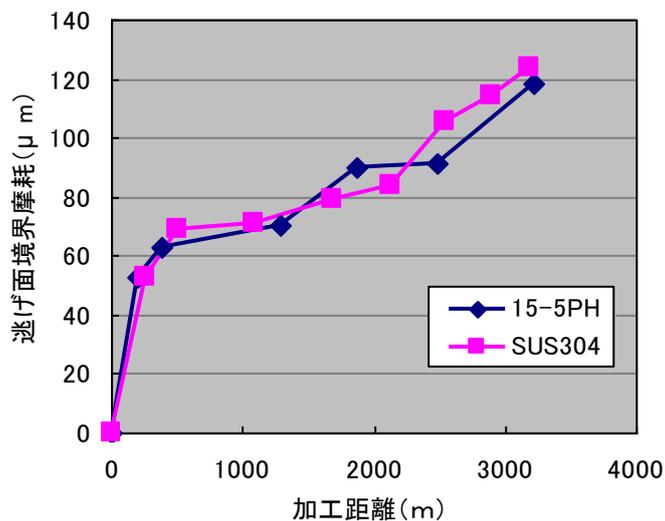
【図2 工具①SMによる15-5PHの切りくず排出／加工表面状態】

スケール：  100mm

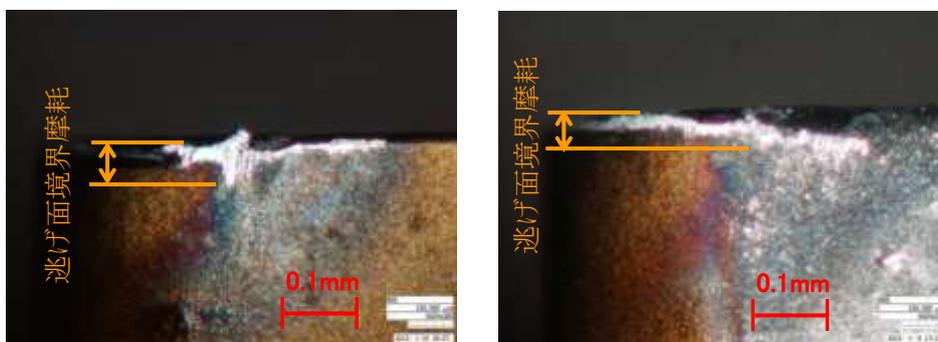
		送り(mm/rev)			
		0.2	0.25	0.3	
切りくず	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			
加工表面	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			

【図3 工具①SMによる SUS304 の切りくず排出／加工表面状態】

図4に加工距離による工具摩耗を逃げ面境界摩耗幅で示した。図5に加工距離約3200mのときの工具の逃げ面を示し、図4における逃げ面境界摩耗幅の測定箇所を示した。工具の逃げ面の境界摩耗幅が100 μm を超えるまで切削加工を行ったが、両者ともほぼ同様に摩耗が進むことが分かった。15-5PHを切削した工具には材料のSUS304を切削した工具の逃げ面には材料が擦りついたような痕が見られるが、15-5PHを切削した工具にはそのような痕は見られなかった。SUS304は工具材料との親和性が高い材料であるが、15-5PHは親和性が低いと思われる。



【図4 加工距離による工具摩耗】

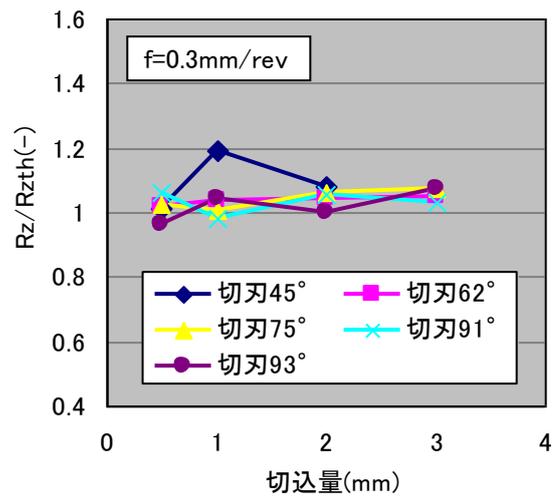
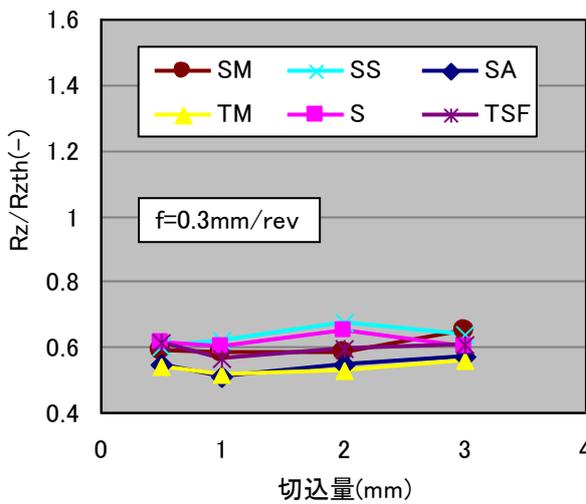
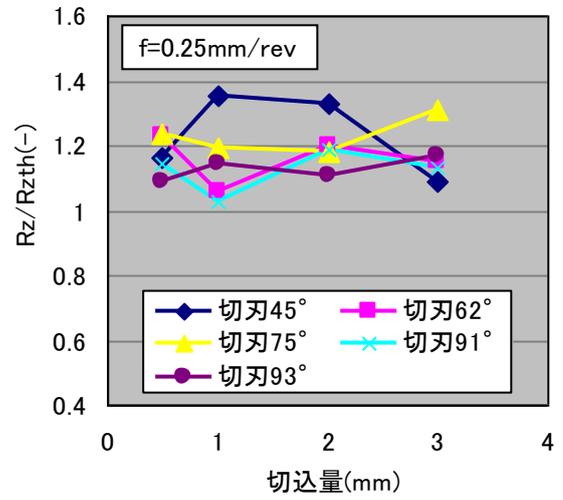
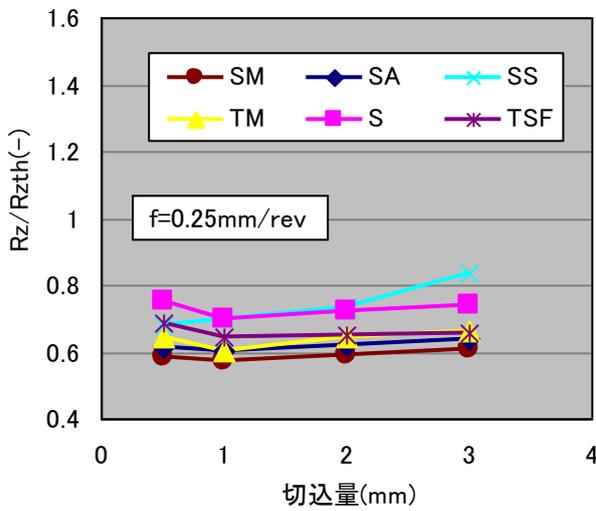
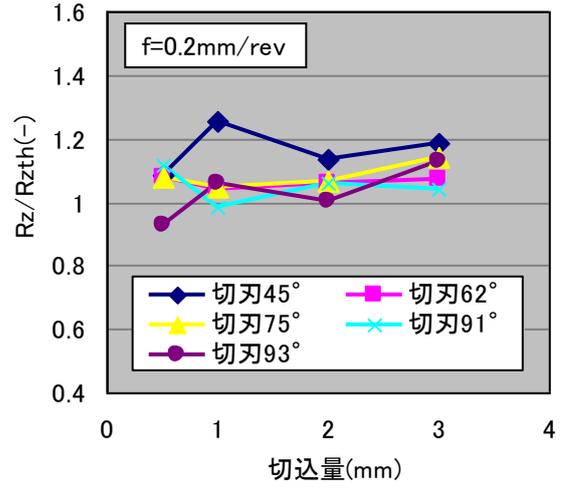
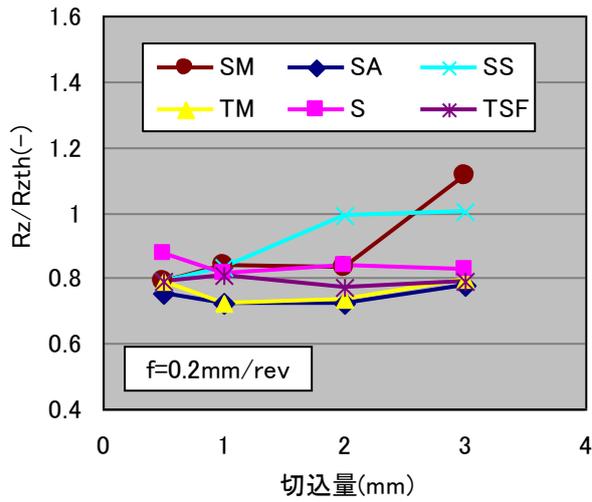


【図5 工具摩耗状況 (加工距離 3200m 左: 15-5PH 右: SUS304)】

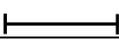
図6に形状(ブレード)別工具6種類(左列)と切刃形状別工具5種類(右列)による15-5PHの切削加工における表面粗さ指標Rz/Rzthを送りf毎に示めす。また、図7から図16に各工具による切りくずの形状と加工表面状態を示す(①SMの切りくず形状と加工表面状態については図2と図3を参照のこと)。形状(ブレード)別工具における理論仕上げ粗さは、送りf=0.2mm/revでRzth=12.5 μ m、送りf=0.25mm/revでRzth=19.53 μ m、送りf=0.3mm/revでRzth=28.13 μ mである。切刃形状別工具5種類における理論仕上げ粗さは、送りf=0.2mm/revでRzth=6.25 μ m、送りf=0.25mm/revでRzth=9.77 μ m、送りf=0.3mm/revでRzth=14.06 μ mである。

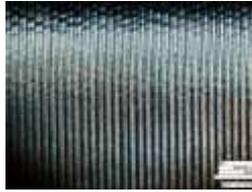
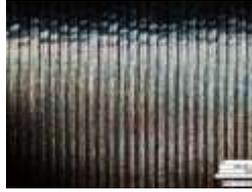
6種類の工具の中で①SMは全条件において、送り0.2(mm/rev)、切込量3mm以外は理論値を下回り良好な加工表面であった。また、切込量0.5mmでは切りくずの排出性が悪いので、切込量は1mm以上で使うのが望ましいと思われる。②SAは送りに係わらずRz/Rzthは小さく、切りくず排出性と加工表面状態も良好であり広範囲な条件で使用できる工具であると思われる。逆に③SSは全ての送りと切込量でRz/Rzthが大きく、切りくず排出性は悪く、加工表面にはむしれが見られた。③SSは15-5PHの切削には向いていないと思われる。④TMは②SAと同等に全条件でRz/Rzthが小さかった。切りくずの排出性は切込量0.5mmにおいて切りくずが分断されず螺旋状に連なる傾向があり、工具への絡まりが懸念される。加工表面状態については切込量2mm以上で送り0.3mm/revにおいてむしれが見られた。⑤Sは③SSに次いでRz/Rzthが大きかった。また、切りくずの排出性は悪くないが、切込3mmの重切削においてむしれが見られた。⑥TSFは全ての条件においてRz/Rzthは平均的な値であった。6種類の工具の中では切りくずの排出性が最も良好であった。加工表面も良好であった。15-5PHの切削に適している工具の一つであると思われる。

⑦切刃45°は切刃形状別工具5種類の中でRz/Rzthは大きい方であった。切りくずの排出性については分断されず螺旋状に長く伸びる傾向にあった。また、切込量3mmで送り0.3mm/revにおいては切削加工の途中でスピンドルが停止してしまった。切刃形状が45°なので切刃と材料との接触距離が長く抵抗が大きいためと思われる。面取りなど特殊な用途の加工のときは切込量や送りを小さくして使うのがよいと思われる。⑧切刃62°は全条件においてRz/Rzthがほぼ平均的な値であった。切込量が1mm以下で切りくずが不規則になるので、切込量を2mmか3mm程度で使用するのが良いと思われる。⑨切刃75°も全条件においてRz/Rzthが平均的な値であった。切りくずの排出性については切込量が0.5mmと3mmのとき分断されず螺旋状に伸びるが、形状が安定してまっすぐ伸びるため工具へ絡まる可能性は低いと思われる。送り0.3mm/revで切込量2mmと3mmでビビリ振動が見られた。⑩切刃91°も全条件においてRz/Rzthがほぼ平均的な値であった。切りくずの排出性は切込量0.5mmのとき切りくずが不規則形状になる傾向にあった。切込量0.3mmで送り0.3mm/revにおいてビビリ振動が見られた。⑪切刃93°は切込量が2mm以下でRz/Rzthがやや小さい値を示した。切りくずの排出性は切込量1mm以下のとき切りくずが不規則形状になる傾向にあった。ビビリ振動は見られなかった。

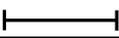


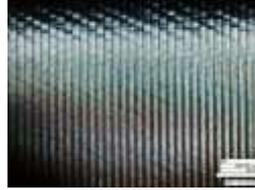
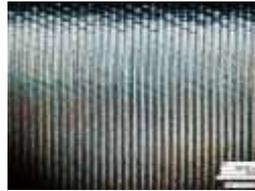
【図6 各工具における15-5PHの表面粗さ(左列:ブレード別、右列:切刃形状別)】

スケール：  100mm

		送り(mm/rev)			
		0.2	0.25	0.3	
切りくず	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			
加工表面	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			

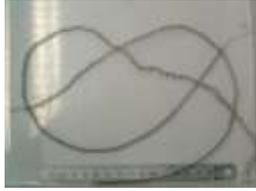
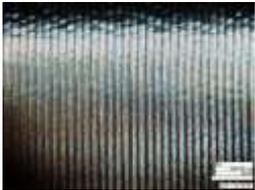
【図7 工具②SAによる15-5PHの切りくず排出／加工表面状態】

スケール：  100mm

		送り(mm/rev)			
		0.2	0.25	0.3	
切りくず	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			
加工表面	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			

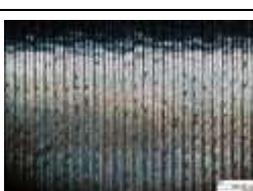
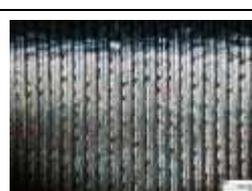
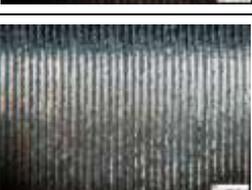
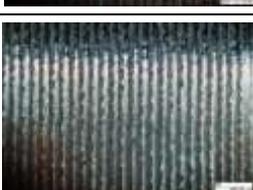
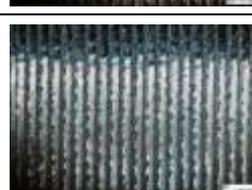
【図8 工具③Sによる15-5PHの切りくず排出／加工表面状態】

スケール：  100mm

		送り(mm/rev)				
		0.2	0.25	0.3		
切りくず	切込量(mm)	0.5				
		1				
		2				
		3				
	加工表面	切込量(mm)	0.5			
			1			
			2			
			3			

【図9 工具④TMによる15-5PHの切りくず排出／加工表面状態】

スケール：  100mm

		送り(mm/rev)				
		0.2	0.25	0.3		
切りくず	切込量(mm)	0.5				
		1				
		2				
		3				
	加工表面	切込量(mm)	0.5			
			1			
			2			
			3			

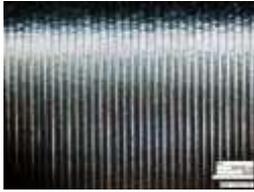
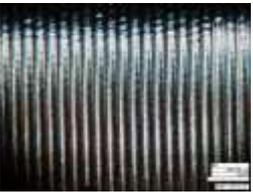
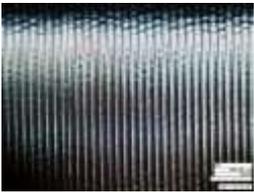
【図 10 工具⑤SS による 15-5PH の切りくず排出／加工表面状態】

スケール：  100mm

		送り(mm/rev)			
		0.2	0.25	0.3	
切りくず	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			
加工表面	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			

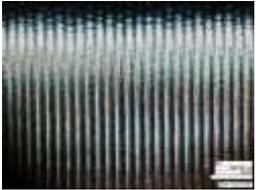
【図 11 工具⑥TSF による 15-5PH の切りくず排出／加工表面状態】

スケール：  100mm

		送り(mm/rev)			
		0.2	0.25	0.3	
切りくず	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			スピンドル停止
加工表面	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			スピンドル停止

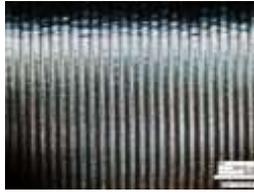
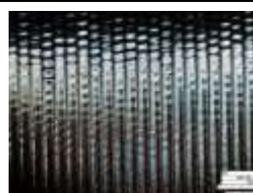
【図 12 工具⑦切刃 45° による 15-5PH の切りくず排出／加工表面状態】

スケール：  100mm

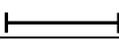
		送り(mm/rev)			
		0.2	0.25	0.3	
切りくず	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			
加工表面	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			

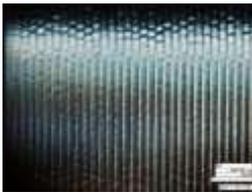
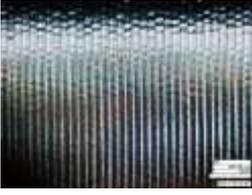
【図 13 工具⑧切刃 62° による 15-5PH の切りくず排出／加工表面状態】

スケール：  100mm

		送り(mm/rev)				
		0.2	0.25	0.3		
切りくず	切込量(mm)	0.5				
		1				
		2				
		3				
	加工表面	切込量(mm)	0.5			
			1			
			2			
			3			

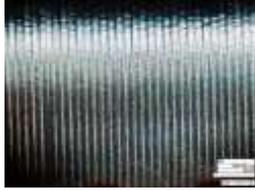
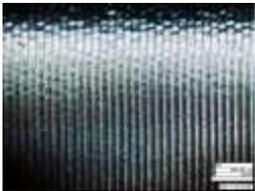
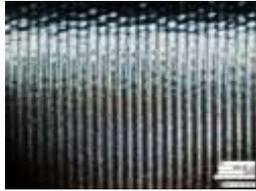
【図 14 工具⑨切刃 75° による 15-5PH の切りくず排出／加工表面状態】

スケール：  100mm

		送り(mm/rev)			
		0.2	0.25	0.3	
切りくず	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			
加工表面	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			

【図 15 工具@切刃 91° による 15-5PH の切りくず排出／加工表面状態】

スケール：  100mm

		送り(mm/rev)			
		0.2	0.25	0.3	
切りくず	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			
加工表面	切込量(mm)	0.5			
		1			
		2			
		3			

【図 16 工具⑩切刃 91° による 15-5PH の切りくず排出／加工表面状態】

3 結言

本調査により以下のことが明らかになった。

- (1) 工具形状 SM (切刃形状 95° , 刃先角 80° , すくい角 10° , ノーズ R0.4mm) で 15-5PH と SUS304 の切削加工を行い、比較を行った。理論仕上げ面粗さ R_z に対する表面粗さ R_z の比 (R_z/R_{zth}) はほぼ同等であることが分かった。また、SUS304 は切込量と送りが大きくなるとビビリ振動が発生したが、15-5PH はビビリ振動の痕は見られなかった。工具摩耗についてはほぼ同等であった。
- (2) 工具形状 (ブレーカ) 別および切刃形状別で 15-5PH の切削加工特性を調べた。工具形状別では SA (切刃形状 95° , 刃先角 80° , すくい角 6° , ノーズ R0.4mm) において R_z/R_{zth} が小さく、⑥TSF (切刃形状 95° , 刃先角 80° , すくい角 18° , ノーズ R0.4mm) において切りくずの排出性が良いことが分かった。切刃形状別では⑩切刃 93° (切刃形状 93° , 刃先角 55° , すくい角 10° , ノーズ R0.8mm) において表面粗さ R_a が小さく、⑨ 75° (切刃形状 75° , 刃先角 90° , すくい角 10° , ノーズ R0.8mm) において切りくずの排出性が良いことが分かった。

構造用非鉄合金の切削加工

岩手県工業技術センター 飯村 崇、古川直樹

1. 緒言

近年、小径エンドミルの開発が進み、 $\phi 0.01\text{mm}$ のエンドミルが一般的に販売される様になった。これに伴い、従来は放電加工などで加工していた機械部品の微細部分をマシニングセンタで同時加工し、段取り作業による時間のロスと加工精度低下を防ぐことが可能となる。特に医療機器は生体への負荷の低減を目的に、また、航空機や自動車産業は部品の多機能化を目的に、今後さらに小型化が進むと考えられる。しかしこのような特殊用途に使用される Co 合金やベリリウム銅などの特殊な材料は、微細工具による加工実績がほとんど表に出ていないため、このような加工の注文を受ける際にも、実際にテストカットを行う必要があったり、そもそも得体の知れない材料であると断ってしまったりと、商機を逃がしてしまう可能性が高い。その為、小径工具による切削の実施例を公開することができれば、東北の企業のこのような加工への参入がスムーズになり、岩手県で製造される CCM 合金を使用した医療機器産業などへの進出のハードルを下げることも可能である。

そこで、生体材料として知られている CCM 合金 (Co-Cr-Mo 合金) および、構造用の特殊材料として知られるベリリウム銅について、微細加工実験を行い、①加工条件と②その条件で加工した際の加工物表面、③工具表面を調査し、用途にあった加工ができる様にデータを提供する。

2. CCM 合金の切削加工

生体材料として、人工関節の骨頭や、義歯床などに使用されている Co-Cr-Mo 合金について、小径エンドミル ($\phi 1\text{mm}$) で加工を行い、工具寿命と被削材の表面粗さを比較する。

2. 1 CCM 合金の特性

耐食性・耐摩耗性が高い材料であり、医療用の材料として、義歯床や人工関節のように強度と耐摩耗性が必要とされる部分に多く使用されている。岩手県の株式会社エイワでは、東北大千葉教授を中心に進められた CCM 合金開発事業の中で、CCM 合金を製造販売する体制が整い、股関節用の棒材や義歯用のディスク材が作られている。この合金は独自の結晶組織制御技術により、Ni レスにもかかわらず高延性で高加工性を有し、さらに高機械強度・高耐摩耗性・高耐食性を持ち合わせている。すなわち、アレルギーを引き起こす Ni をほとんど含まない高機能生体用コバルトクロム合金となっている。表に、主な医療用材料と Co-Cr-Mo 合金の機械的特性を示す。なお、CCM 合金は加工による組織の緻密化で硬度を出す材料であるが、今回の実験には硬さが HRC43 の合金を使用した。

表 1 医療用材料の特性比較

	仕上げ方法	降伏点 [MPa]	引張強度 [MPa]	破断伸び [%]	絞り [%]	硬度 [HRC]
SUS420	焼入、焼き戻し	664	900	23	59	29
Ti-6Al-4V	溶体化時効	1100	1170	10	-	38
Co-Cr-Mo 合金 (ASTM)	熱間加工	≥ 700	≥ 1000	≥ 12	≥ 12	28
Co-Cr-Mo 合金 (エイワ)	熱間加工	1197	1643	28.9	31.8	50.9

2. 2 小径スクエアエンドミルによる切削加工

2.2.1 加工条件

市販のφ1mm スクエアエンドミルを用いて切削加工を行い、CCM 合金の加工に適した大まかな条件の選定 2.2.2 と工具の選定 2.2.3 を行う。被削材の CCM 合金は、断面が□10×17mm の棒材である。各条件について、1 面加工（除去体積 10×17×1.5mm）を 2 回を行い、工具表面の観察（ミットヨ QV-HYPER404PRO）と被削材表面の観察（Zygo 社 NewVIEW100）を行った。

表 1 使用工具

番号	メーカー	刃の枚数	種類
1	A 社	2	仕上げ用
2	A 社	4	焼き入れ鋼用
3	B 社	2	仕上げ用 1
4	B 社	3	仕上げ用 2 (Cr 系コーティング)
5	B 社	2	CrN コーティング(銅、アルミ用)
6	B 社	2	DLC コーティング(アルミ用)
7	B 社	2	DIA コーティング (アルミ用)
8	B 社	4	焼き入れ鋼用
9	C 社	3	Co 合金用

表 2 加工条件

	条件 1	条件 2	条件 3
スピンドル回転数 (rpm)	5000	10000	20000
送り速度 (mm/min)	22.5	45	90
切り込み (軸方向×径方向 (mm))	1.5×0.05		
加工液	エマルジョンタイプ		
送り方向	アップ/ダウン交互		
加工機	DMG 社 HSC-55Liner		

2.2.2 加工条件の選定

表 1 の 1 番の工具を使用し、表 2 の 1～3 の加工条件で実験を行った。

加工後の刃物先端の拡大図を図 1 に示す。条件 1 及び 3 については、1 面目加工時の刃先端の状況はコーティング剥がれや欠けなど、それほど顕著ではなかったが、2 面目のアップカット時にいずれも折損している。それに対し、条件 2 は 2 面の加工ができたことから、今回実験した中では条件 2 が最も適している。ただし先端には欠けが見られ、CCM 合金を大きく除去する加工にはこの工具はあまり適していない可能性がある。また、工具の種類によっても適する加工条件が変わってくることから、今後さらに条件を絞り込んでいきたいと考えている。

図 2 は加工面を ZYGO 社の NewView100 にて、観察した結果である。条件 1 の 1 面目は加工が問題なく進んでいることが、送り方向に規則正しく残っているカッターマーク（刃先によってつけられたと考えられる）から判断できる。しかし、2 面目の大きい凹凸に着目すると傾斜していることが確認でき、アップカットで加工する際の負荷が大きく、刃物がたわんでいた可能性があると考えられる。次に、条件 2 はアップカット側のカッターマークがきれいに残っており、2 面目においても問題なく加工できている。条件 3 については、2 面目で刃物のビビリが原因と思われる大きな凹凸が見られることから、既に加工限界に達していたものと考えられる。

以上の結果から、今回の実験では、折損せずに2面を加工し、加工物の表面にもカッターマークがきちんと残っている条件2が適していることがわかった。

図1 工具観察結果

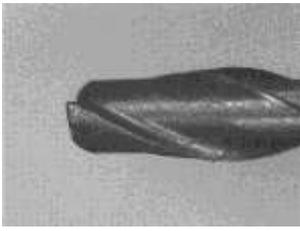
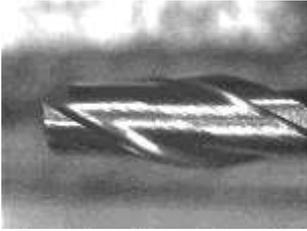
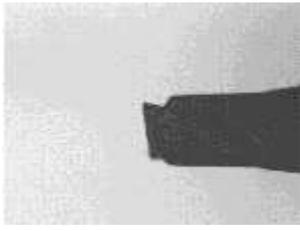
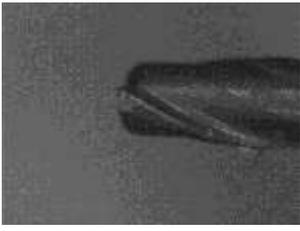
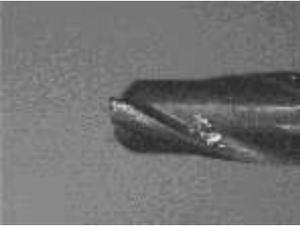
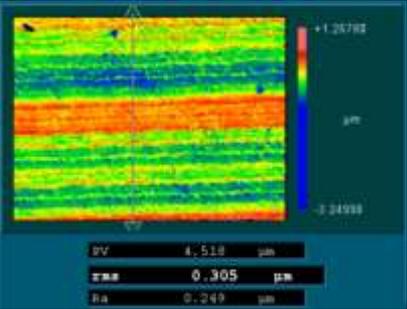
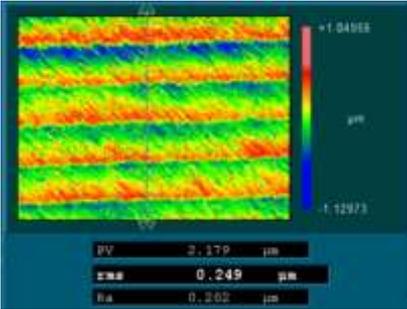
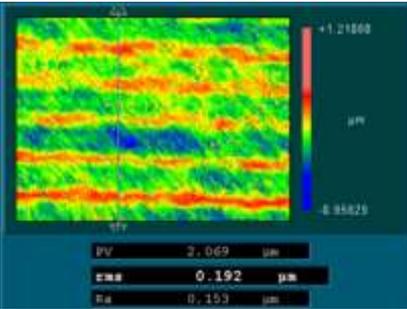
加工条件	工具初期	1 面目	2 面目	備考
条件 1			折損	アップカット時折損
条件 2				2面加工完
条件 3			折損	アップカット時折損

図2 被削材表面粗さ観察結果

加工条件	1 面目	2 面目	備考
条件 1			1 面目はカッターマークがきれいに残っている。ただし、所々大きく凹凸になっている。 2 面目は凹凸が傾斜になっており、アップカット時に刃がたわんでいたと思われる。
条件 2			カッターマークがきれいに残っている。

<p>条件 3</p>			<p>1 面目はアップ側と見られるカッターマークが残っているがやや不規則。 2 面目は、規則的だが大きな凹凸が見える。工具の振動によるものと考えられる。</p>
-------------	--	--	--

2.2.3 工具の違いによる加工能力の比較

2.2.2 で得られた結果を基に、加工条件 2 で表 1 に示す工具を用いて加工を行った際の、工具表面及び被削材表面の観察結果を比較する。図 3 に工具表面、図 4 に被削材表面の観察結果を示す。

今回の実験では、2 面を加工できたのは、焼き入れ鋼用の高強度高耐摩耗性の工具と汎用工具の一部のコーティングのみであった。このことから、いわて発 CCM 合金加工には、焼き入れ鋼用の高硬度なエンドミルの使用が最も適していると考えられる。汎用工具の中では、A 社のエンドミルと B 社の CrN コーティングを施したエンドミルのみが 2 面加工できている。CrN のコーティングは他のコーティングと比較し、硬さ、耐熱性、摩擦係数などの数値はそれほど高くない。特徴としては、非鉄金属の耐凝着性を高めてあるコーティングであることから、CCM 合金加工の加工には、耐凝着性を高めたコーティングが有効であると考えられる。同様に耐凝着性を高めたコーティングとして、ダイヤモンド及び DLC があるが、過去に研削砥石の試験を行った際、ダイヤモンド砥石による CCM 合金の加工では砥石の摩耗が激しく、加工が進まなかったのと同様に、工具がすぐに折損してしまった。原因としては、CCM 合金に含まれる Cr とダイヤモンドや DLC の炭素が結合し Cr 炭化物を作るために、コーティングがすぐに効果を失ってしまったためと考えられる。また C 社の CCM 合金用エンドミルであるが、いわて発合金は通常の CCM 合金と比べ硬度が高く、工具への負荷が大きいため十分にその能力を発揮できなかったものと考えられる。図 4 を見ても、焼き入れ鋼用の刃物 2 本による切削面が規則正しい凹凸と、刃先によってつけられたと考えられる細かいカッターマークで構成されており、安定した切れ味が続いていることが確認できた。

以上のことから、いわて発の CCM 合金加工には、焼き入れ鋼用のエンドミルを使用するのが望ましいと考えられる。

図 3 工具表面観察結果

工具番号	工具初期	1 面目	2 面目	備考
1				2 面加工完 一部欠け有り
2				2 面加工完

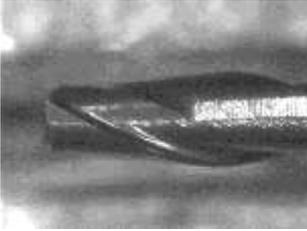
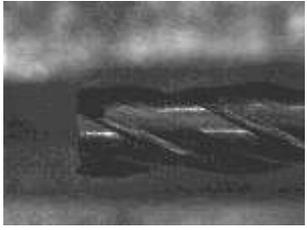
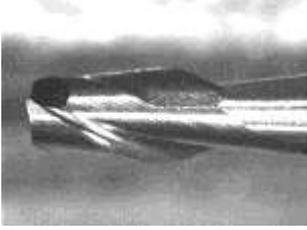
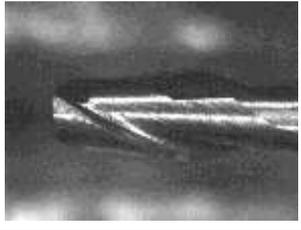
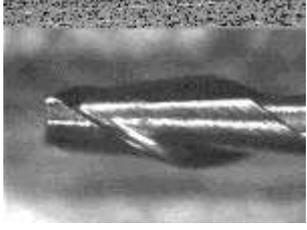
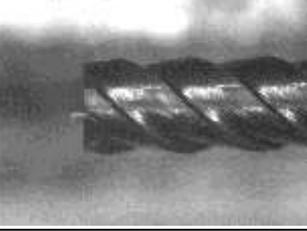
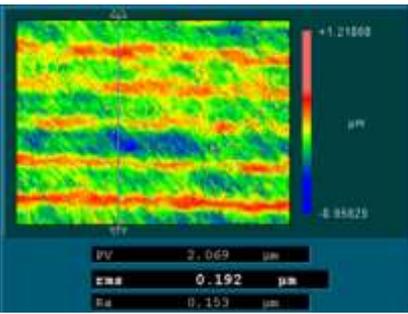
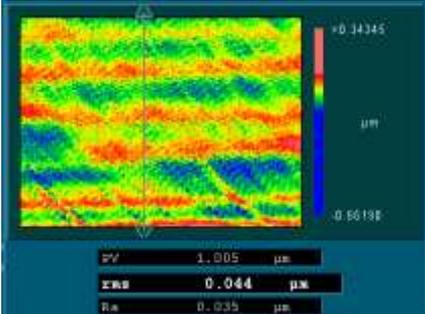
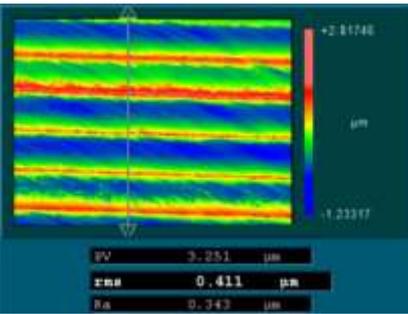
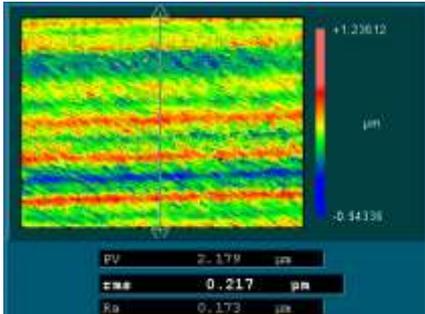
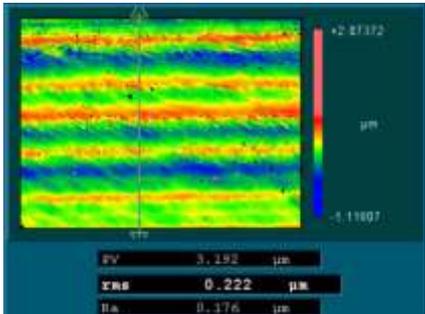
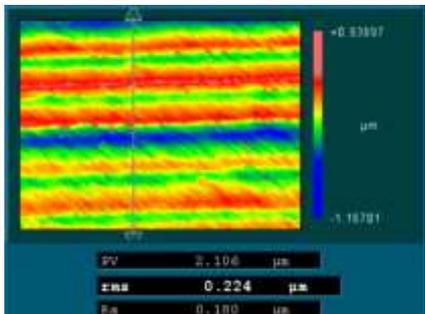
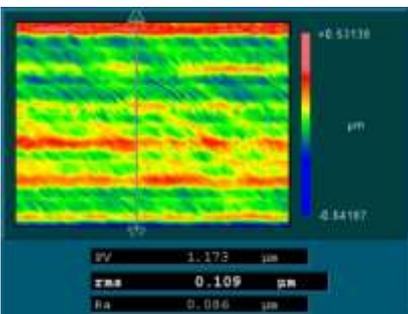
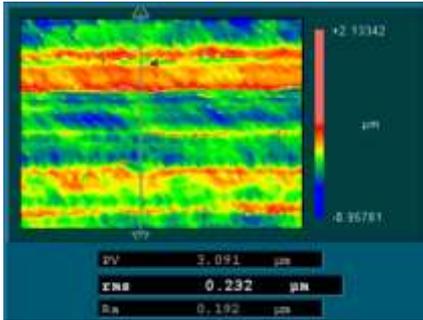
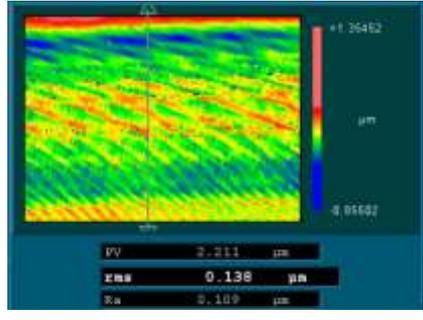
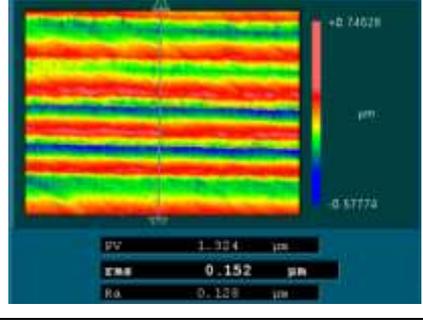
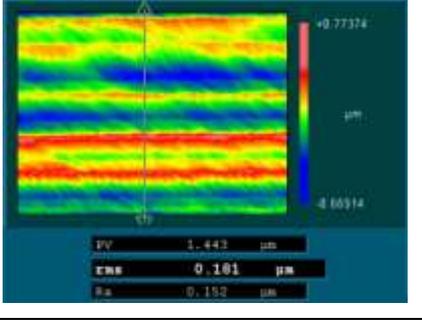
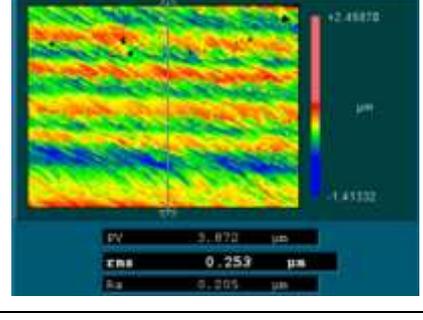
工具番号	工具初期	1 面目	2 面目	備考
3		折損	—	アップカット時 折損
4		折損	—	アップカット時 折損
5				2 面加工完 一部欠け有り
6		折損	—	アップカット時 折損
7		折損	—	アップカット時 折損
8				2 面加工完
9		折損	—	アップカット時 折損

図4 被削材表面粗さ観察結果

工具番号	1 面目	2 面目	備考
1			<p>カッターマークが残っている。</p>
2			<p>全体的にカッターマークが見られ、安定して加工できている。</p>
3		<p>折損</p>	<p>刃先で切っている様な細かいカッターマークが見られないことから、既に刃先が傷んでいると考えられる。</p>
4		<p>折損</p>	<p>刃先で切っているカッターマークが一部にしか見られないことから、既に刃先が傷んでいると考えられる。</p>
5			<p>全体的にカッターマークが見られ、安定して加工できている。</p>

工具番号	1 面目	2 面目	備考
6		折損	刃先で切っている様な細かい カッターマークが見られな いことから、既に刃先が傷 んでいると考えられる。
7		折損	刃先で切っている様な細かい カッターマークが見られな いことから、既に刃先が傷 んでいると考えられる。
8			全体的にカッターマークが 見られ、安定して加工でき ている。
9		折損	刃先で切っている様な細かい カッターマークが見られな いことから、既に刃先が傷 んでいると考えられる。

2. 3 ボールエンドミルによる仕上げ加工（粗さ）

微細な部品の切削加工においては、加工物の表面粗さを低くする仕上げ加工が必要となる。そこで、ボールエンドミルによる仕上げ加工を想定し、エンドミルの径と粗さとの関係を調査した。使用した工具は表 3 に示す 5 種類である。加工条件は表 4 に示す通りで、マシニングセンタによる被削材上面の仕上げ加工（取り代 0.2mm、スキヤロップ値 2.5 μm）を想定している。径方向の送りは、目的のスキヤロップ値となる送り量を計算により求めた。

図 5 に、実験結果を示す。R0.5mm の場合、目視での評価では、加工面に若干のうねりが見られる。これは工

具径φ1mmに対し、軸方向の切り込み0.2mmが大きく、工具の強度が不十分であったことが原因であると考えられる。また、粗さの測定値を見るとPVが5.4μmと目標の2.5μmよりも大きな値となっており、表面粗さからも条件が適していないことがわかる。R1.0mm、R2.0mmについては、目視での評価において良好な加工面が得られている。粗さについてはR1.0mmの場合PV4.0μmと大きな値であるが、R2.0mmについては、PV1.1μmと目標値よりも低い値となっている。また加工表面にはカッターマークが確認できることから、加工については特に問題はないと考えられる。R4.0mm、R5.0mmについては、目視においても送り目がはっきり確認できるため、用途によっては問題がある。粗さについては狙い通りPV2.0~2.5μmに収まっており、カッターマークも確認できることから、こちらも良好な加工が行われていると考えられる。

以上のことから、工具径が大きくなるほど加工自体は安定し、R4.0mmやR5.0mmになれば粗さも狙い通りの数値を出せるようになるが、目視による判断ではR1.0mmやR2.0mmが良好である。また、R0.5mmについても、軸方向の切り込みをかえてバランスを取ることで、うねりのない良好な加工面を得られる可能性がある。

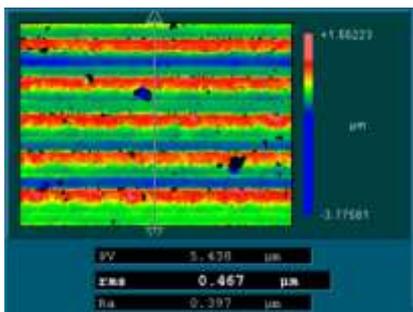
表3 使用工具

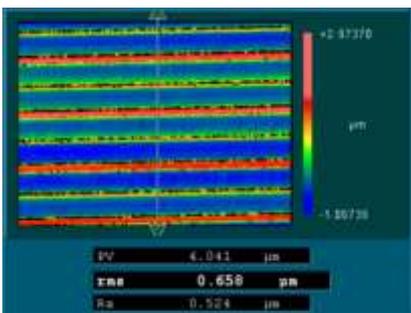
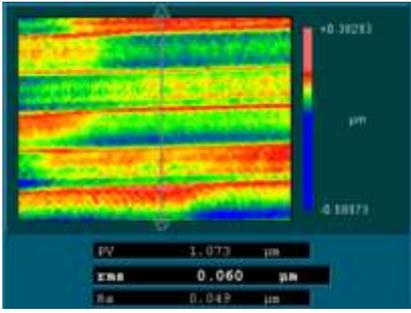
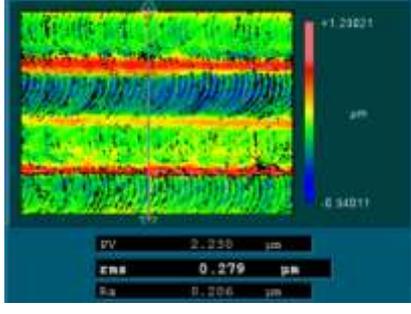
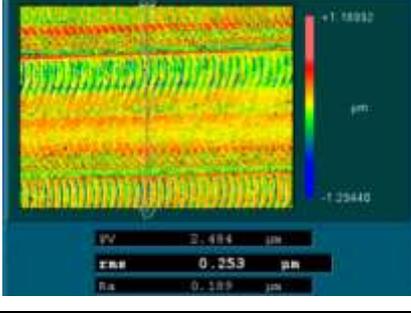
番号	メーカー	径	刃の枚数	種類
1	B社	R0.5	2	仕上げ用コーティング ボールエンドミル
2	B社	R1		
3	B社	R2		
4	B社	R4		
5	B社	R5		

表4 仕上げ加工条件

	R0.5	R1.0	R2.0	R4.0	R5.0
スピンドル回転数 (rpm)	10000				
送り速度 (mm/min)	45				
切り込み (Z方向 (mm))	0.2				
切り込み (径方向 (mm))	0.05	0.07	0.10	0.14	0.16
加工液	エマルジョンタイプ				
送り方向	アップ/ダウン交互				
加工機	DMG社 HSC-55Liner				

図5 被削材表面粗さ観察結果

工具番号	粗さ	表面写真	備考
1	 <p>PV 5.430 μm Rz 0.467 μm Ra 0.397 μm</p>		<p>目視：表面に若干うねりが見える。 粗さ：数値が大きい。</p>

工具番号	粗さ	表面写真	備考
2			目視：良好 粗さ：数値が大きい。
3			目視：良好 粗さ：数値良好
4			目視：工具送りによる凹凸が はっきり見える 粗さ：数値良好
5			目視：工具送りによる凹凸が はっきり見える 粗さ：数値良好

3. ベリリウム銅の切削加工

3. 1 ベリリウム銅の特性

導電性の高い銅合金の中で、合金鋼に匹敵する強度とバネ性を持つ特殊材料で、古くからコネクタやスイッチ等に使用されており、現在でも携帯電話・パソコン・自動車・航空機などを中心に広く使用されている。東北でも多くの企業がプレス、曲げなどの加工を行っているものと考えられる。切削加工により発生する粉塵に毒性があるので、加工には注意が必要である。表 5 に他の金属材料とベリリウム銅の物性値の比較を示す。

表5 ベリリウム銅の物性値

	密度 (g/cm ³)	ヤング率 (GPa)	降伏強さ (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
SUS304	8	197	205	520	40
黄銅	8.5	110	—	280	50
ベリリウム銅	8.2	130	—	900	—

3. 2 工具の違いによる加工能力の比較

国内でも良く使用されている材料であるが、その用途の多くはコネクタであり、切削加工に関する事例は少ない。そこで、このベリリウム銅について、表6に示す6種類のエンドミルを用いて切削加工実験を行い、ベリリウム銅の加工に適した工具の選定を行うこととする。加工条件は表2に示す条件2を用いる。被削材のサイズは、断面が□10×30mmの棒材である。CCM合金と同様に1面加工（除去体積10×30×1.5mm）を2回行い、その際の工具表面および被削材表面の観察を行った。

表6 使用工具

番号	メーカー	刃の枚数	種類
1	B社	2	コーティング無し
2	B社	3	仕上げ用
3	B社	2	CrNコーティング(銅、アルミ用)
4	B社	2	DLCコーティング
5	B社	2	DIAコーティング
6	B社	4	焼き入れ鋼用

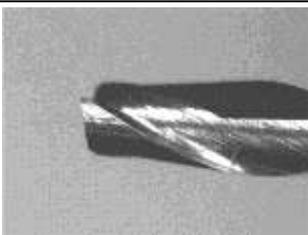
図6には加工後の工具表面を観察した結果を、図7には被削材の表面を観察した結果を示す。

工具については、今回の加工量ではコーティングのはげや刃の欠けの様な大きな変化が無く、コーティングのないタイプも含めて、いずれの工具においても問題なく加工できている。

加工物表面を見るとDLCコーティングの工具において、1面目と2面目の表面状態が変化しているが、工具表面に変化は見られないことから、今のところ変化の原因はわからない。

今回の実験では、コーティングの違いによるベリリウム銅の付着性などについてはほとんど判別できないレベルであることから、コーティングによる差を確認するため、今後さらに時間をかけて調査を行っていく。

図6 工具表面観察結果

工具番号	工具初期	1面目	2面目	備考
1				

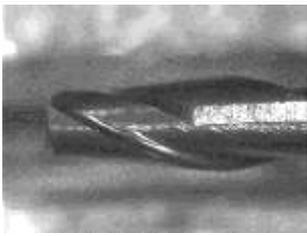
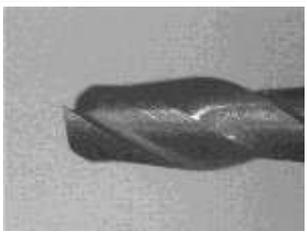
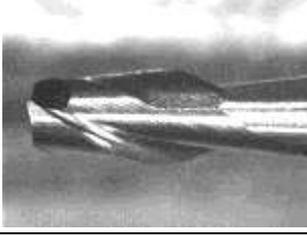
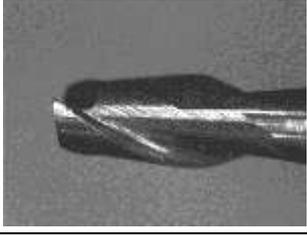
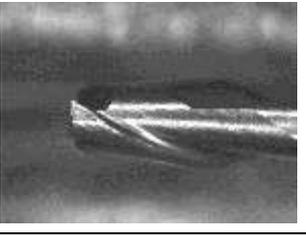
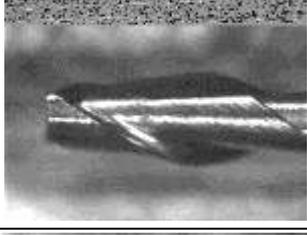
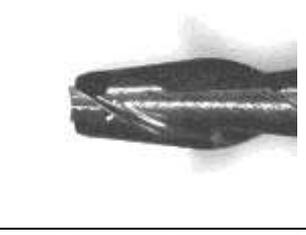
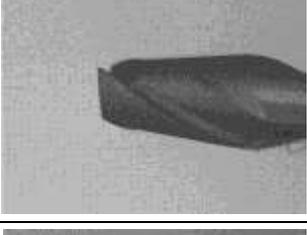
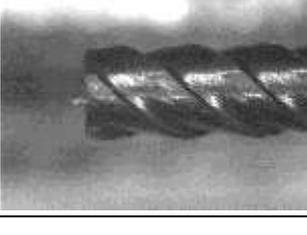
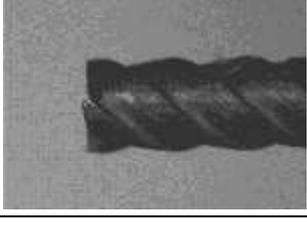
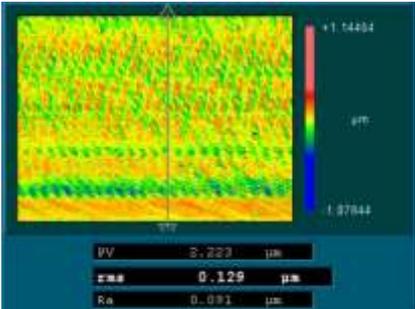
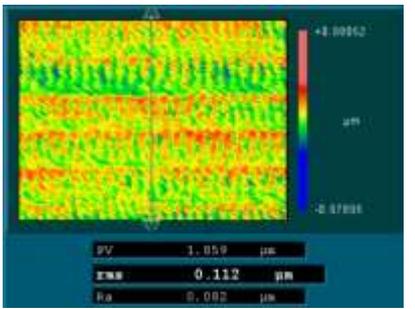
工具番号	工具初期	1 面目	2 面目	備考
2				
3				
4				
5				
6				

図 7 被削材表面粗さ観察結果

工具番号	1 面目	2 面目	備考
1	 <p>PV 3.223 μm 平均値 0.129 μm Ra 0.091 μm</p>	 <p>PV 1.859 μm 平均値 0.112 μm Ra 0.082 μm</p>	表面の状態がやや変化

工具番号	1 面目	2 面目	備考
2			
3			
4			表面状態が変化
5			表面状態がやや変化
6			表面状態がやや変化

4. 結 言

本研究により以下のことが明らかとなった

(1) 株式会社エイワ製のいわて発 CCM 合金の加工には、焼き入れ鋼用のエンドミルを使用する必要がある。これは、従来の CCM 合金と比べ高い硬度を有するためであると考えられる。また、あえて汎用工具で加工する場合には、CrN のコーティングの様に、耐凝着性を高めたエンドミルを選択すると良い。ただし、ダイヤモンドや DLC は Cr との化学反応が原因と思われる摩耗が進むため適さない。

折損は全てアップカットの際に起こっており、取り代が大きい場合は CCM 合金加工における工具寿命を考えると、アップカットを極力避けた方が良いと考えられる。

(2) CCM 合金の表面をボールエンドミルで仕上げる場合、目視では R1.0mm~2.0mm が、粗さの数値では R2.0mm 以上が適しており、必要とされる機能に応じて使い分けると良い。

(3) ベリリウム銅の加工においては、今回の実験では加工量が少なくコーティングの違いによる差を確認するには至らなかった。今後追加で確認を行っていく予定である。

また、今回は触れていないが、工具への被削材の凝着の様子や、カッターマークと工具形状の関係、バリの発生など多くの評価項目が考えられることから、今後も継続して実験を行っていく予定である。

複合材料(CFRP)及び耐熱合金の切削加工技術

秋田県産業技術センター 加藤 勝、沓澤 圭一

1. 緒言

複合材料であるCFRP（炭素繊維強化プラスチック）は、その軽くて強い特性によって省エネルギーを実現するものとして、航空機のみならず自動車や家電等に更なる応用が期待されている。しかしながら、CFRPの切削加工（穴あけ、トリム等）では、工具摩耗が激しいこと、バリやデラミネーション（層間剥離）等が発生することが課題となっており、高能率・高品質に加工することが求められている。また、CFRPはその成形方法の相違によって特性に違いがあり、加工形態にも相違が見られる材料である。

近年、各工具メーカーからCFRP加工用と称される工具が販売されるようになってきた。昨年度の本事業では、最もニーズが多い穴加工を対象に、数種類の工具（ドリル、エンドミル）を用いて、穴加工及びエンドミルによるヘリカル穴加工実験を行い、工具摩耗やCFRPの加工状態について調査した。今年度は、数種類のルーターやエンドミルを用いて、トリム加工（取り除き加工）実験を行い、工具摩耗やCFRPの加工状態について調査したので報告する。

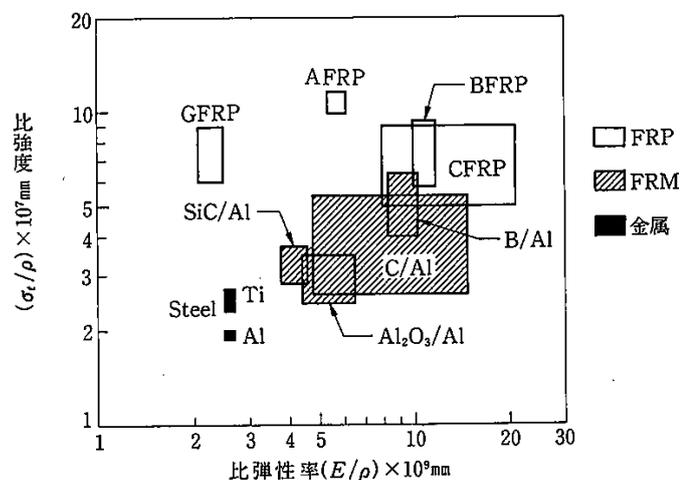
また、近年の航空機産業への参入支援に相まって、航空機のジェットエンジン関係で使用される耐熱合金（インコネル、ハステロイ等）の加工ニーズも出始めている。そこで、ニッケル基の耐熱合金であるハステロイX材を対象に、数種類のドリル工具を用いて穴加工実験を行い、同様に工具摩耗や加工状態を調査したので報告する。

2. 調査研究内容

2-1の項では一般的なCFRPの材料特性について、2-2の項ではルーターやエンドミルによるCFRPのトリム加工技術について、2-3の項ではハステロイXの材料特性について、2-4の項ではドリルによるハステロイXの穴加工技術について述べる。

2-1 CFRPの特性

CFRP（Carbon Fiber Reinforced Plastic:炭素繊維強化プラスチック）は、炭素繊維に合成樹脂（一般的にはエポキシ樹脂）を含浸した後、硬化させて成形した複合材料（Composite）である。炭素繊維は5~10 μ mの太さの極細繊維であり、優れた力学的特性を持っているが、PAN系とピッチ系があり、弾性率、強度だけでなく、熱的特性など物理的性質でも多くの種類がある。



【図1 各種材料の比強度・比弾性率】

製品の性能要求を満たすために適した炭素繊維を選定する必要があり、希望の特性を得るために PAN 系とピッチ系を組み合わせることもある。

一般的な CFRP 成形では、材料としてエポキシ樹脂マトリックスのプリプレグシート（一般的な厚みは 0.1mm から 0.3mm 程度）を用いる。プリプレグシートには、一方向のみに炭素繊維を引き揃えた UD 材と、縦・横に炭素繊維を織り込んだクロス材がある。成形品は UD 材を同じ方向に積層して成形した場合と、縦と横に方向を変えて積層して成形した場合では、成形品の性能が大きく変化する。また、プリプレグシートは、 -20°C 以下の冷凍保存が必要であり消費期限も 3~6 ヶ月程度と短いため、近年は平織した炭素繊維を真空引きしながらエポキシ樹脂を含浸させて成形する Vatrm (Vacuum Assist Transfer Resin Mold) 成形法が普及しつつある。

図 1 に各種材料の比強度・被弾率を示す。CFRP は軽くて強い材料であることがわかる。また、表 1 に参考として複合材料 (CFRP・GFRP) やその他材料の機械的特性等を示す。比重はステンレス鋼の 1/4 以下でありながら、引張り強さは約 3 倍と非常に優れていることがわかる。但し、CFRP は耐衝撃性は低いので注意が必要であるとともに、積層材であるので、内部欠陥が生ずる可能性がある。使用に当たっては超音波探傷装置等で検査を必要とする場合もある。

【表 1 複合材料や他材料の主な機械的特性】

素材	比重	引張強さ Mpa	引張弾性率 Gpa	曲げ強さ Mpa	曲げ弾性率 Gpa	線膨張係数 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	熱伝導率 Kcal/mh $^{\circ}\text{C}$	体積低効率 Ωcm	連続使用温度 ガラス転移点 $^{\circ}\text{C}$
CFRP 高強度繊維 (1方向) PAN系	1.5	1570 ~ 4410	118 ~ 147	1270 ~ 1960	88 ~ 127	0.2 ~ 0.4	3.0 ~ 3.5	4×10^{-5}	120 ~ 200
CFRP 高剛性 (1方向) ピッチ系	1.7	1470 ~ 1960	235 ~ 480	590 ~ 1180	147 ~ 412	-0.8 ~ -0.3	4 ~ 5	2×10^{-5}	120 ~ 200
GFRP ガラス繊維 (1方向) Vf.60	2	1080	44	1120	44	7	0.24 ~ 0.28	1×10^{-5}	120 ~ 200
アルミニウム A5052	2.7	245	70	---	---	23.6	100	2.65×10^{-6}	250
ステンレス SUS304	7.9	588	206	---	---	17.5	12.9	4.45×10^{-6}	600
チタン 6AL4V	4.5	98	118	---	---	8.2	6.8	72×10^{-6}	350
グラファイト	1.6 ~ 1.7	2060 ~ 5400	9 ~ 12	21 ~ 88	92 ~ 136	3 ~ 4.2	81 ~ 128	0.9 ~ 2.2	---
C/C コンポジット	1.45 ~ 1.75	49 ~ 80	9293	118 ~ 412	17 ~ 127	0.5 ~ 0.6	3 ~ 5	260 ~ 290	3000

2-2 CFRP のトリム加工技術

【表 2 CFRP 材のトリム加工条件】

2-2-1 実験内容

市販の CFRP 材（穴織カーボン製：100×100×厚さ 10mm、UD+ 表層クロスタイプ、表面つや有り）を対象に、ルータータイプのダイヤモンドコーティング工具 3 種類、エンドミルタイプのダイヤモンドコーティング工具 3 種類、DLC コーティングエンドミル 1 種類、超硬ソリッドエンドミル 1 種類、ハイス母材の TiN 系コーティングエンドミル 1 種類の計 3 社 9 種類の工具を用いて、マシニングセンタ（日立精機製 VKC45 II）で片削りによるトリム加工実験を行った。CFRP 材はバイスに挟んで固定し、各工具とも時間の関係上、切削長 1m（10 パス）まで加工した。切削加工条件を表 2 に示す。

評価として、工具摩耗と加工面状態をマイクロ스코プ（ハイロックス製 KH-2700）で観察し、CFRP の加工面粗さを表面粗さ測定機（東京精密製サーフコム 3000A-3DF）で測定した。

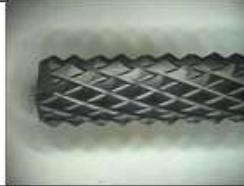
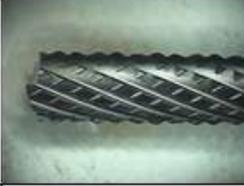
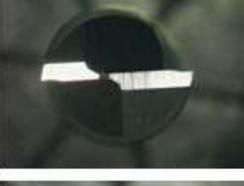
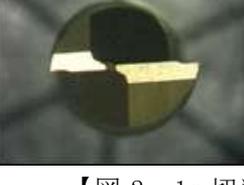
番号	メーカー	形状	材種
①	H社	ルーター	超硬母材ダイヤモンドコーティング
②	M社	ルーター	超硬母材ダイヤモンドコーティング
③	O社	ルーター	超硬母材ダイヤモンドコーティング
④	M社	4枚刃	超硬母材ダイヤモンドコーティング
⑤	O社	4枚刃	超硬母材ダイヤモンドコーティング
⑥	O社	4枚刃逆ねじ	超硬母材ダイヤモンドコーティング
⑦	M社	2枚刃	超硬母材DLCコーティング
⑧	M社	2枚刃	超硬ソリッド
⑨	M社	2枚刃	ハイス母材TiNコーティング
被削材			CFRP(100×100×t10mm) 両面クロス織り ツヤ有り
工具径(mm)			6
主軸回転数(min ⁻¹)			10000
切削速度(m/min)			188
送り速度(mm/min)			1000
1回転当たりの送り(mm/rev)			0.1
径方向切り込み(mm)			1
切削長(m)			1
クーラント			エア吸引
加工方式			ダウンカット

2-2-2 実験結果

2-2-2-1 工具摩耗状態について

図 2 に 1m 切削後の各工具の側面刃の工具摩耗状態を示す。参考として新品状態の底刃形状も示している。①～③のルータータイプ及び④～⑥のエンドミルタイプのダイヤモンドコーティング工具は、切削長 1m 程度では殆ど工具摩耗は観察されず、十分な性能を確認できた。今回は時間の関係上、これらの工具寿命まで切削加工実験を行うことが出来なかったため、今後検討していきたいと考えている。

一方、⑦の DLC コーティング工具は若干刃先部のコーティング部の摩耗が観察された。やはり、DLC コーティングはダイヤモンドコーティングよりも劣ることがわかった。また、⑧の超硬ソリッド工具も、DLC コーティングよりも多く刃先部の摩耗が観察され、特に CFRP の直角方向の積層部に当たる箇所に激しい摩耗が見られた。⑨のハイス母材 TiN コーティング工具は、⑧よりも更に激しく工具摩耗が進み、ハイス母材まで段々上に摩耗していた。従って、今回の加工条件は、⑧や⑨の工具には高すぎる設定であったと思われるが、それらを考慮しても、ダイヤモンドコーティング工具を選定することが適切であると考えられる。

メーカー	タイプ	新品(底刃形状)	新品(側刃形状)	1m切削後	結果
①H社	ダイヤモンドコーティングルーター				摩耗無し ○
②M社	ダイヤモンドコーティングルーター				摩耗無し ○
③O社	ダイヤモンドコーティングルーター				摩耗無し ○
④M社	ダイヤモンドコーティング				摩耗無し ○
⑤O社	ダイヤモンドコーティング				摩耗無し ○
⑥O社	ダイヤモンドコーティング(逆ねじれ)				摩耗無し ○
⑦M社	DLCコーティング				若干摩耗有り△
⑧M社	超硬ソリッド				摩耗有り×
⑨M社	TiNコーティング(ハイス母材)				使用不可×

【図2 1m切削後の工具摩耗状態】

メーカー	タイプ	1m切削後(全面)	1m切削後(表側)	1m切削後(裏側)	結果
①H社	ダイヤモンドコーティングルーター				バリ無し ○
②M社	ダイヤモンドコーティングルーター				バリ無し ○
③O社	ダイヤモンドコーティングルーター				バリ無し ○
④M社	ダイヤモンドコーティング				バリ無し ○
⑤O社	ダイヤモンドコーティング				バリ無し ○
⑥O社	ダイヤモンドコーティング(逆ねじれ)				バリ無し ○
⑦M社	DLCコーティング				若干表側バリ有り△
⑧M社	超硬ソリッド				表側バリ有り×
⑨M社	TiNコーティング(ハイス母材)				カーボン繊維むしれ×

【図3 1m切削後のCFRP側面の加工状態】

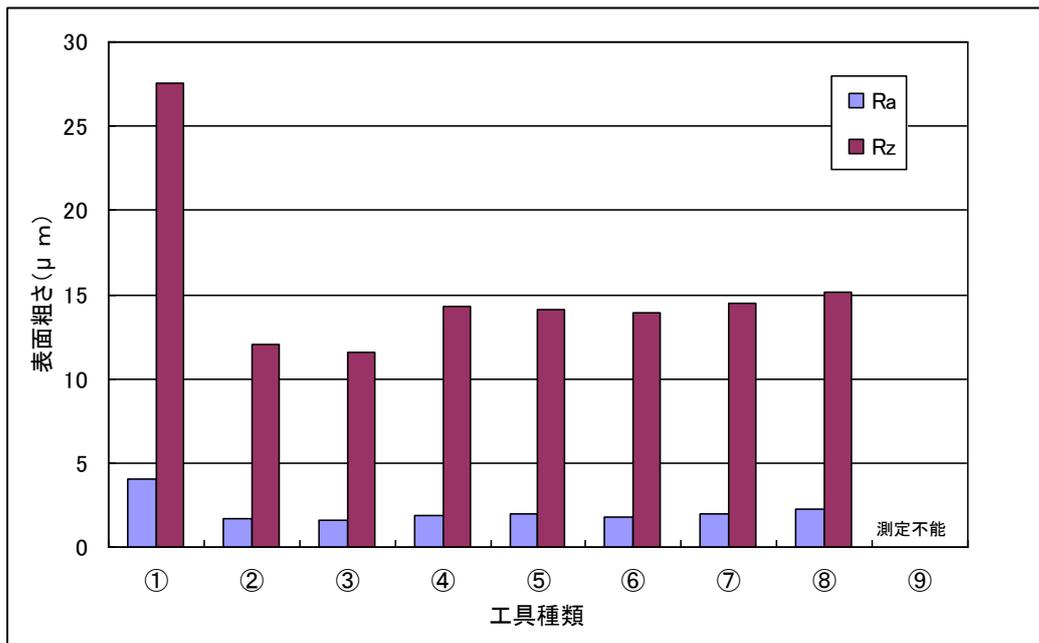
2-2-2-2 CFRP 材の加工状態について

図 3 に 1m 切削後の CFRP 材の加工状態を示す。左側が全面で、中央が表面部、右側が裏面部の拡大した様子である。①～⑥のダイヤモンドコーティング工具は切削面の見た目も良好で、表面・裏面ともバリは見られなかった。ルータータイプとエンドミルタイプの明確な差も見受けられなかった。また、⑥の工具は表層部のバリやデラミネーションを抑制するために、逆ねじれの構造となっている工具であったが、他工具との加工面状態の明確な差は見受けられなかった。一方、⑦の DLC コーティング工具は、表面のクロス織り部で若干のバリが観察された。⑧の超硬ソリッド工具は、同様の箇所で⑦よりも更に大きいバリが観察された。⑨のハイス母材 TiN コーティング工具は、全面でカーボン繊維がむしれた状態になっており、表面もクロス繊維の切り残しが観察された。

上述した CFRP 加工面の状態は、2-2-2-1 で述べた工具摩耗状態の結果と一致しており、工具摩耗が加工面状態に大きな影響を及ぼすことが確認できた。

2-2-2-3 CFRP 材の加工面粗さについて

図 4 に、CFRP 加工面の厚さ方向の加工面粗さを示す。表面粗さはそれぞれ 3 箇所測定した平均値であるが、⑨の工具については加工面がむしれ面であったため測定不能であった。①の工具が著しく加工面粗さが悪く、②、③の工具は逆に最も加工面粗さが良かった。④～⑥の工具はほぼ同様の加工面粗さであった。一般的に、ルータータイプは荒加工向け、エンドミルタイプは仕上げ加工向けと言われているが、ルータータイプでもエンドミルタイプより加工面粗さが良いものがあることがわかった。⑦と⑧の工具は、②～⑥のダイヤモンドコーティング工具に比べて若干加工面粗さが悪化した。これらも工具摩耗によるものと考えられる。従って、加工面状態及び加工面粗さの観点からも、CFRP のトリム加工には、ダイヤモンドコーティング工具が適していると判断できる。また、工具形状はねじれ角の小さい多刃工具が有効であると思われる。



【図 4 CFRP の加工面粗さ】

2-3 ハステロイ X 材の特性

ハステロイ (HASTELLOY) は、主にニッケル基にモリブデンやクロムを多く加えることで耐食性や耐熱性を高めた合金であり、米ヘインズ社 (Haynes International, Inc) の商標である。広く使用されている合金群であるため日本でも一般名化している。ニッケルを主成分する合金でモリブデンやクロム、鉄などの成分量のちがいで、ハステロイ B、ハステロイ C、ハステロイ X などがある。析出硬化型のニッケル基合金に属し、耐酸化性の高いものや耐熱性が高い金属であるため、腐食性環境や高温環境での使用に向くが、物理的強度やクリープ強度、疲労強さは特段の強さを持たないため、構造材には向かない。一般的に、圧力計のダイヤフラムなどの耐食性が求められる場合やジェットエンジンの燃焼室などの耐熱性が求められるものに使用される。表 3 にハステロイの化学成分を示す。今回の実験では、鉄が多く含まれるハステロイ X を被削材とした。ハステロイ X は、1200℃の高温まで耐食性の優れた合金で、加工性、溶接性も比較的良好な材料である。

【表 3 ハステロイ材の化学成分】

合金の商品名 "HASTELLOY ○○"	Ni	Co	Cr	Mo	W	Fe	Si	Mn	C	その他
B-2	69	≦1	≦1	28	-	≦2	≦0.1	≦1	≦0.01	-
B-3	≧65	≦3	1.5	28.5	≦3	1.5	≦0.1	≦3	≦0.01	Al≦0.5, Ti≦0.2
C-4	65	≦2	16	16	-	≦3	≦0.08	≦1	≦0.01	Ti≦0.7
C-2000	59	≦2	23	16	-	≦3	≦0.08	-	≦0.01	Cu-1.6
C-22	56	≦2.5	22	13	3	3	≦0.08	≦0.5	≦0.01	V≦0.35
C-276	57	≦2.5	16	16	4	5	≦0.08	≦1	≦0.01	V≦0.35
G-30	43	≦2	30	5.5	2.5	15	≦1	≦1.5	≦0.03	Nb≦0.8, Cu≦2
N	71	≦0.2	7	16	≦0.5	≦5	≦1	≦0.8	≦0.08	Al+Ti≦0.5, Cu≦0.35
W	63	≦2.5	5	24	-	6	≦1	≦1	≦0.12	V≦0.6
X	47	≦1.5	22	9	0.6W	18	≦1	≦1	≦0.10	B≦0.008

2-4 ハステロイ X の穴加工技術

2-4-1 実験内容

ハステロイ X 材 (φ80×厚さ 5mm) を対象に、超硬ソリッドドリル 2 種類、超硬母材コーティングドリル 2 種類、ハイス母材コーティングドリル 3 種類の計 5 社 7 種類の工具を用いて、マシニングセンタ (日立精機製 VKC45II) で G83 のステップ送りによる穴あけドリル加工実験を行った。ハステロイ X 材はバイスに挟んで固定し、各工具とも時間の関係上、10 穴まで加工を目標とした。切削加工条件を表 4 に示す。クーラントのかけ方については、④の工具のみセンタースルー対応なので内部給油とし、その他の工具は外部給油とした。評価として、工具摩耗とハステロイ X の加工状態をマイクロ스코ープ (ハイロックス製 KH-2700) で観察した。

2-4-2 実験結果

2-4-2-1 工具摩耗状態について

図5に10穴加工後(⑥と⑦は途中で中止)の各工具の底刃の工具摩耗状態を示す。参考として新品状態の底刃形状も示している。①及び②の超硬ソリッド工具は、共に10穴加工が可能であり、①は刃先先端の僅かな摩耗が観察された。②は工具剛性を持たせるためシンニングを施さず芯厚を厚くし、スクイ角も小さめの構造とした特注品であるが、底刃片部に僅かチップングが見受けられた。上述した構造が逆に切削抵抗を上げてしまったために起こったものと推定される。③及び④のコーティング工具は、共に10穴加工可能であり刃先先端の摩耗がそれぞれ観察されたが、③の複合多層コーティング工具の方が摩耗は少なく、④の工具の方が摩耗は多かった。④は内部給油方式なので摩耗の抑制に寄与するものと思われたが、内部給油の明確な効果は認められなかった。

一方、⑤～⑦のハイス母材コーティング工具については、⑤は10穴加工可能であったが、刃先摩耗は特に底刃片部で多かった。③と⑤は母材違いの同じコーティング品であるが、ハイス母材の方が超硬母材よりも摩耗が多いことがわかった。価格は超硬母材の方がハイス母材の約2倍するが、超硬母材を選択する方が賢明であろう。また、⑥の工具は5穴で、⑦の工具は4穴で底刃の工具欠損が確認されたため加工中止とした。今回の実験により、ハイス母材のTi系コーティング工具は適さないことがわかった。

2-4-2-2 ハステロイX材の加工状態について

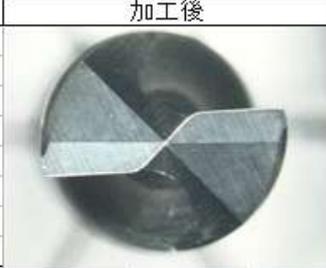
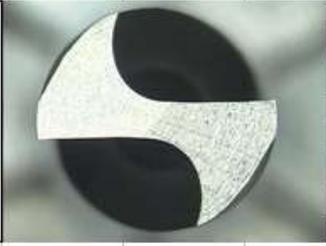
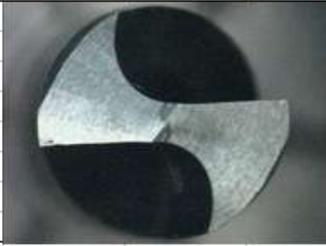
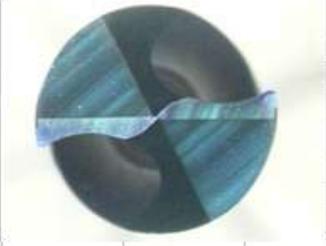
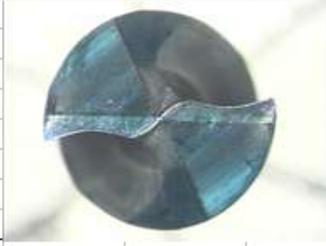
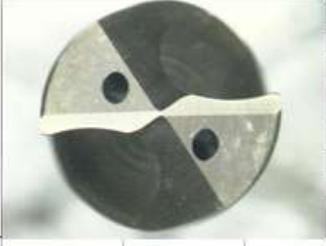
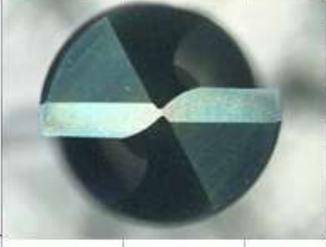
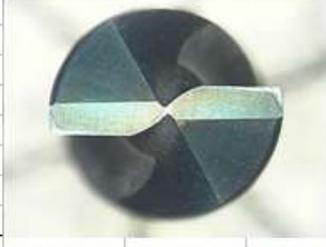
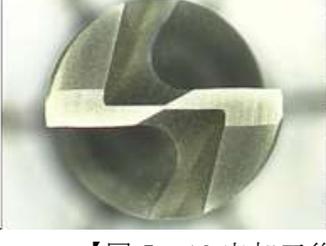
図6にハステロイX材の10穴目の加工状態を示す(⑥は5穴目、⑦は4穴目)。①～④の超硬系工具は、写真ではわかりにくいが入り側及び出口側のバリも比較的少なく、良好な加工状態であった。特に①と③の穴内壁の加工状態が良好であり、これは上述した工具摩耗状態と結果が一致していた。

一方、⑤の工具は10穴加工可能であったが、①～④の超硬系工具よりもバリは多く観察された。⑥及び⑦の工具はそれぞれ未貫通となっており、工具欠損による影響を受けている様子が見受けられた。

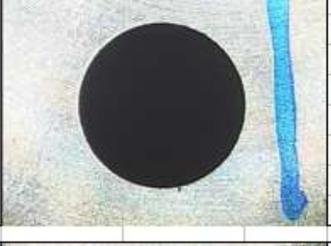
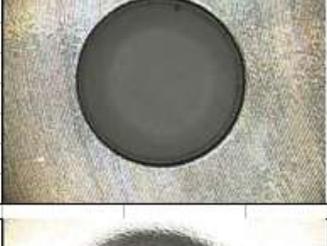
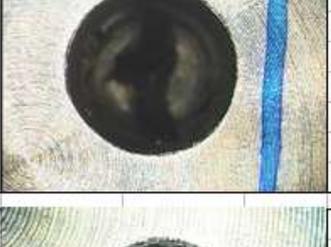
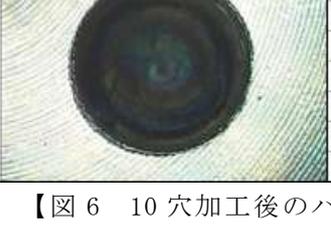
以上のことから、ハステロイXの穴加工では、コーティングに関係なくハイス母材工具は不適であり、超硬ソリッドまたは超硬コーティング工具が適していると判断できる。また、シンニングを施している工具の方が工具に掛かる負荷も少なく、工具寿命が良くなると考えられる。

【表4 ハステロイXの切削加工条件】

番号	メーカー	材種
①	M社	超硬ソリッド
②	T社	超硬ソリッド
③	O社	超硬母材複合多層コーティング
④	H社	超硬母材TiSiN系コーティング
⑤	O社	ハイス母材複合多層コーティング
⑥	O社	ハイス母材TiN系コーティング
⑦	F社	ハイス母材TiCNコーティング
被削材		ハステロイX t5mm
工具径(mm)		6
主軸回転数(min ⁻¹)		1000
切削速度(m/min)		18.8
送り速度(mm/min)		50
1回転当たりの送り(mm/rev)		0.05
軸方向切り込み(mm)		1
目標加工穴数(穴)		10
クーラント		水溶性エマルジョン
加工方式		G83固定サイクル

工具	タイプ	新品	加工後	加工穴数	結果
①M社	超硬ソリッド			10穴OK	刃先摩耗小○
②T社	超硬ソリッド			10穴OK	刃先若干 チッピング 有り△
③O社	超硬母材 複合多層 コーティング			10穴OK	刃先摩耗小○
④H社	超硬母材 TiSiN系 コーティング オイルホール 付き			10穴OK	刃先摩耗中△
⑤O社	ハイス母材 複合多層 コーティング			10穴OK	刃先摩耗大△
⑥O社	ハイス母材 TiN系コー ティング			5穴中止	欠損×
⑦F社	ハイス母材 TiCN系 コーティング			4穴中止	欠損×

【図5 10穴加工後の工具摩耗状態】

工具	タイプ	入口側	出口側	加工穴数	結果
①M社	超硬ソリッド			10穴OK	バリ小○
②T社	超硬ソリッド			10穴OK	バリ小○
③O社	超硬母材 複合多層 コーティング			10穴OK	バリ小○
④H社	超硬母材 TISIN系 コーティング オイルホール 付き			10穴OK	バリ小○
⑤O社	ハイス母材 複合多層 コーティング			10穴OK	バリ中△
⑥O社	ハイス母材 TIN系コー ティング			5穴中止	未貫通×
⑦F社	ハイス母材 TiCN系 コーティ ング			4穴中止	未貫通×

【図6 10穴加工後のハステロイXの加工状態】

3.結 言

本実験により以下のことが明らかになった。

○CFRP 材のトリム加工について

- (1) CFRP 材のトリム加工では、工具寿命や加工品位の観点から、超硬母材のダイヤモンドコーティング工具の使用を推奨する。超硬及び DLC コーティング工具でもトリム加工は可能であるが、直ぐにバリ等が生じる可能性が高い。また、ハイス母材コーティング工具は不適である。
- (2) ダイヤモンドコーティング工具では、一般的にルータータイプは荒加工向け、エンドミルタイプは仕上げ加工向けと言われているが、仕上げ面粗さは明確な差は見られないものもある。また、ダイヤモンドコーティングの膜厚が加工品質に影響する可能性が高いので、出来る限りシャープな切れ刃を有する超微粒・薄膜のダイヤモンドコーティングが良い。
- (3) ねじれ角の大きい工具は表面のバリやデラミネーション（層間剥離）を促進する可能性があるため、工具形状としては、ねじれ角の小さい多刃工具が有効であると考えられる。
- (4) 一概に CFRP 材と言っても多種多様である。工具メーカーが CFRP 加工用と推奨する工具でも、すべての CFRP 材に適するとは限らない。従って、テスト加工等を踏まえて工具選定することが望ましい。

○ハステロイ X の穴加工について

- (1) 工具材質としては、超硬ソリッドまたは超硬母材のコーティング工具の使用を推奨する。また、工具形状としては、シンニングを施したシャープな切れ刃を有する形状が良いと考えられる。
- (2) ハイス母材のコーティング工具は、コーティングの種類により使用可能なものもあるが、一般的には使用不可と判断できる。
- (3) 本実験で使用したセンタースルードリルは、切屑排出性は良かったが工具摩耗の抑制にはあまり効果が認められなかった。標準形状より価格が高い分、使い分けが必要であると考えられる。

参考文献

- (1) 「炭素繊維の最先端技術」 シーエムシー出版
- (2) 「航空機材料」 (社)日本航空技術協会
- (3) 米ヘインズ社ホームページ

次世代高度電子機械産業で使われる素材の加工技術開発

宮城県産業技術総合センター 久田哲弥、渡辺洋一、齋藤佳史

サブテーマ 1：無酸素銅の切削加工技術

1. 諸 言

無酸素銅は放電加工用の電極材料として金型の仕上げ加工や、超鋼製金型の加工に広く使用される材料であるが、金型の微細化、高精度化に伴い電極材の加工精度の高度化が進んでいる。一方加速器に使用される加速管本体は無酸素銅のセルで構成されており、高精度な加工技術が要求されている。そこで本調査では無酸素銅の加工について、要求精度に応じた表面性状を得るための最適加工条件を得るために、加工データベースを構築することを目的とし、エンドミルによる切削加工実験を実施した。

2. 調査研究内容

無酸素銅は酸素含有量が 5ppm 以下の純銅で、軟質で被加工面が傷つきやすく表面粗さを高精度に加工するのが難しい。ソリッドエンドミルを使用する場合、一般的にはスキイ角が大きく刃先のシャープな工具を使用し、低い送り速度、高い切削速度の加工条件で加工する。これにより被削材の切り取り厚さが小さくなり良好な加工表面を得ることができる。また、無酸素銅を加工する際は反応熱による工具の拡散摩耗が進行するため、コーティング材種として窒化クロム (CrN) を使用する場合も多い。本調査では市販の工具とその最適加工条件を踏まえ、無酸素銅の加工実験を行い加工条件と表面性状の相関についての知見を得た。

実験では市販品である三種類のエンドミルを使用した。それぞれの工具について同一の加工条件にて無酸素銅を切削加工し、被加工面の表面性状の調査を観察と表面粗さの計測を行うことで実施した。次に工具摩耗をエンドミルのニゲ面摩耗幅を計測することで評価し、加工長さとも摩耗量の相関関係について調査を実施した。

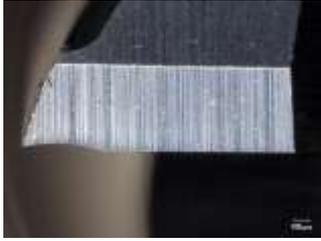
2-1. 実験方法

実験には市販品である三種類の工具（以下 A・B・C とする）を使用し、表 1 に使用した工具の仕様を、表 2 に工具のスキイ面、ニゲ面の拡大写真を示した。工具はいずれもソリッドのスクエアエンドミルで直径が 5.0mm、シャンク径は 6.0mm である。工具 A は TiAlN コーティングで鋼材加工用、工具 B は DLC コーティングでアルミ加工用、工具 C は CrN コーティングで銅電極加工用として販売されているものである。表 2 のスキイ面の拡大写真から軟質材加工に適した工具 B と工具 C は刃先の先端角が小さくなっていることが分かった。

【表 1 実験に使用した工具】

工具	製造者	型式	外径[mm]	シャンク径[mm]	コーティング
A	日進工具	MSE230	5.0	6.0	TiAlN
B	日進工具	AL3D 2DLC	5.0	6.0	DLC
C	ミスミ	CRN-CUEM5	5.0	6.0	CrN

【表 2 工具先端部拡大写真】

	工具 A	工具 B	工具 C
スクイ面			
ニゲ面			

加工実験に使用した加工機は宮城県産業技術総合センターに設置の 5 軸マシニングセンタを使用した。加工機の外観と仕様について図 1 と表 3 に示した。



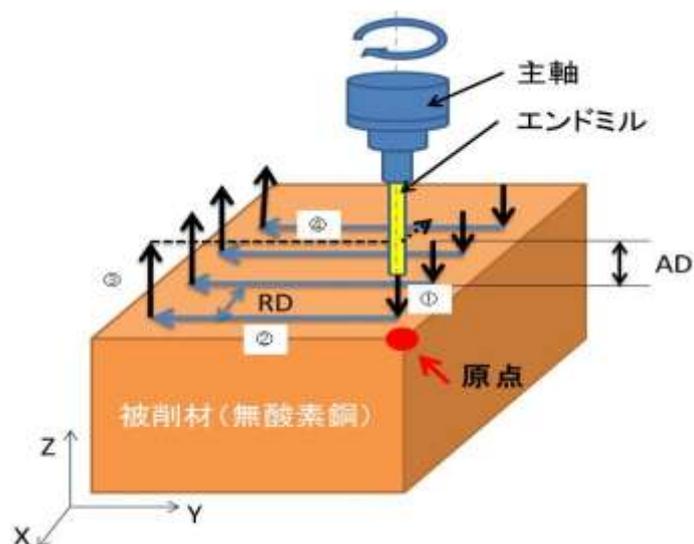
【図 1 実験に使用した加工機（アジエシャルミー社製 HSM400U LP）】

【表 3 5 軸マシニングセンタの仕様】

メーカー 型式	アジエシャルミー HSM400U LP
テーブルサイズ	Φ 156mm
加工ワークサイズ	Φ 230mm×200mm (最大積載重量 25kg)
主軸回転数	最大 42,000[/min.]
軸構成	XYZBC
駆動方式	リニアモータ
工具ホルダー	HSKE-40

加工方法はダウンカット方式で行い、工具の動作について図 2 に示した。材料右手前（赤丸）を原点とし、工具を軸方向に切り込み（AD）、Y 軸方向に走査し、退避高さまで移動後 Y 軸方向の原点まで復帰させて、X 軸方向にピックフィード量（RD）移動させてから、軸方向に切り込む

方式とした。



【図2 加工方法】

加工条件を表4に示す。工具切り込み量については仕上げ加工取り代を考慮した切り込み量とした。オイルミストはUnilube2032、切削液はユシロ化学工業株式会社製ユシローケン AP-EX-E3を10倍希釈で使用した。

【表4 加工条件】

項目	値
工具回転数[/min.]	10,000~40,000
切り込み量	AD0.1mm RD1.0mm
一刃送り量	10 μ m 50 μ m 100 μ m
冷却方法	オイルミスト 切削液

表面性状の評価は、顕微鏡による表面観察と粗さ計による表面粗さの評価により行った。図3に顕微鏡の外観を、図4に表面粗さ測定機の外観を示す。顕微鏡はキーエンス社製顕微鏡VHXを使用し、表面粗さ測定機はアメテックテラーホブソン社製フォームタリサーフPGI1250Aを使用した。

工具摩耗量の評価には顕微鏡により工具先端のニゲ面を観察しコーティングの剥離状態を観察した後、コーティングが剥離した箇所を含めた摩耗幅の距離測定を実施することで行った。



【図3 マイクロ스코ープの外観】



【図4 表面粗さ測定機の外観】

2-1. 実験結果

2-1-1 表面性状の評価

工具 A でオイルミスト冷却方法にて加工した加工面の観察結果について表 5 に示した。なお、マイクロSCOPE観察した場合、切削痕は黒い線となって観察される。工具回転数 40000、一刃送り量 $10\mu\text{m}$ の条件で加工した場合の表面性状が良好であることが確認できた。次に工具 A で切削液冷却方法により加工した加工面の観察結果について表 6 に示した。オイルミスト冷却方法と比較して切削痕が少なく、良好な加工面が得られた。特に回転数 20000、送り量 $50\mu\text{m}$ が最も鏡面に近い面となった。

【表5 工具 A でオイルミスト冷却方法にて加工した加工面の観察結果】

回 転 数		10000	20000	30000	40000
一 刃 送 り 量	10 μm				
	50 μm				
	100 μm				

【表 6 工具 A で切削液冷却方法にて加工した加工面の観察結果】

回転数		10000	20000	30000	40000
一 刃 送 り 量	10 μ m				
	50 μ m				
	100 μ m				

工具 B でオイルミスト冷却方法にて加工した加工面の観察結果について表 7 に示した。全体的に切削痕が多く発生している様子が観察された。また、一刃送り量が 10 μ m の条件では切削痕が不規則になっていることも確認できた。表 8 に工具 B で切削液冷却方法にて加工した加工面の観察結果を示した。なお、観察画面右上に確認できる黒い線はレンズに付着した異物である。オイルミスト冷却方法と比較すると切削痕が少なく良好な加工面が得られた。また、同条件の工具 A と比較すると切削痕が多くなる傾向が得られた。

【表 7 工具 B でオイルミスト冷却方法にて加工した加工面の観察結果】

回転数		10000	20000	30000	40000
一 刃 送 り 量	10 μ m				
	50 μ m				
	100 μ m				

【表 8 工具 B で切削液冷却方法にて加工した加工面の観察結果】

回転数		10000	20000	30000	40000
一刃送り量	10 μ m				
	50 μ m				
	100 μ m				

工具 C でオイルミスト冷却方法にて加工した加工面の観察結果について表 9 に示した。一刃送り量が 100 μ m の加工条件では切削痕が明確に確認できた。また切削痕が二重になっている箇所も確認できた。表 10 に工具 C で切削液冷却方法にて加工した加工面の観察結果を示した。オイルミスト冷却方法の結果と同様、一刃送り量が 100 μ m の加工条件では切削痕が明確に確認できた。オイルミスト冷却方法と比較すると良好な加工面が得られたが、工具 A と比較し、改善の度合いが少ない結果となった。

【表 9 工具 C でオイルミスト冷却方法にて加工した加工面の観察結果】

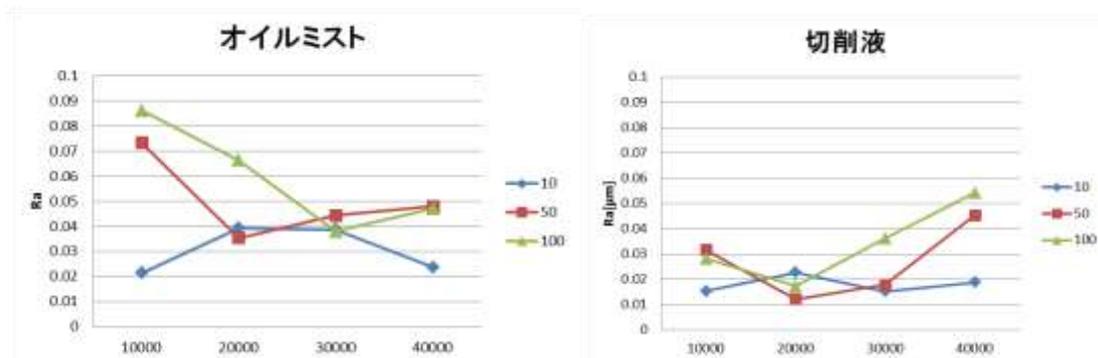
回転数		10000	20000	30000	40000
一刃送り量	10 μ m				
	50 μ m				
	100 μ m				

【表 10 工具 C で切削液冷却方法にて加工した加工面の観察結果】

回転数		10000	20000	30000	40000
一刃送り量	10 μm				
	50 μm				
	100 μm				

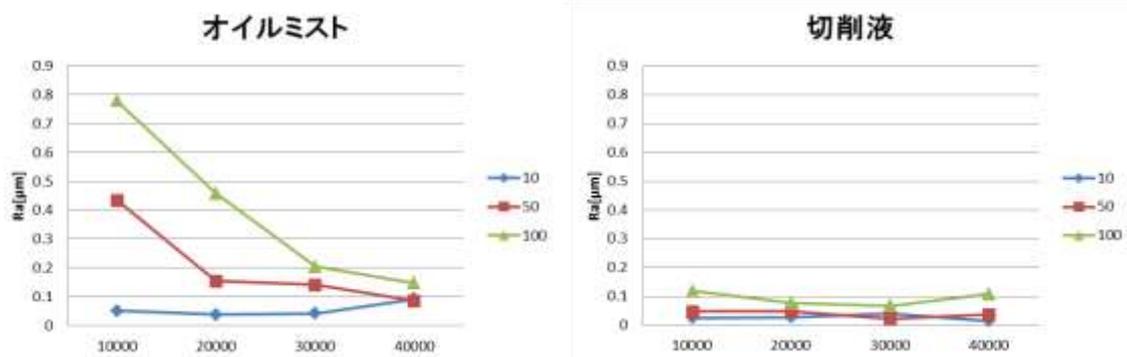
2-1-2 表面粗さの評価

工具 A で加工した場合の表面粗さの結果について図 5 に示した。オイルミスト冷却方法と比較して切削液冷却方法による加工方法で良好な表面粗さが得られた。特に切削液冷却方法では工具回転数 20000、一刃送り量 50 μm にて表面粗さは最小となり、表面粗さは 0.012 μm Ra 以下となった。前項の表面性状の観察結果からも当該条件にて良好な表面性状が得られていることが確認できた。



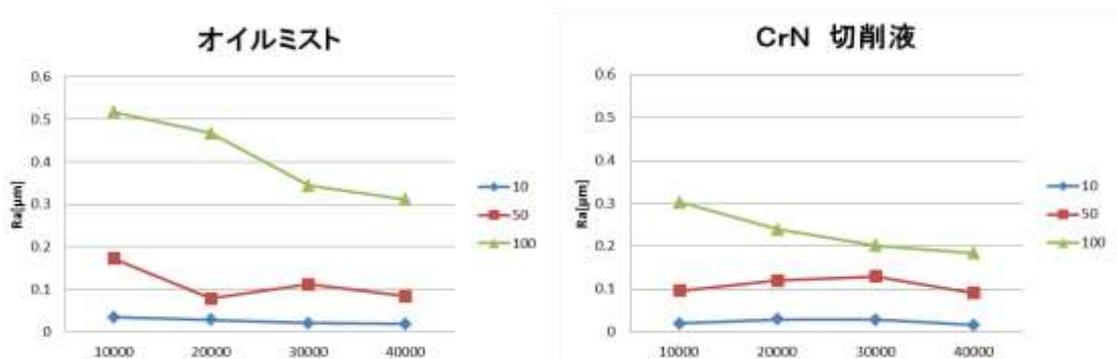
【図 5 工具 A で加工した場合の表面粗さ測定結果】

工具 B で加工した場合の表面粗さの結果について図 6 に示した。オイルミスト冷却方法と比較して切削液冷却方法により加工した場合に良好な表面粗さが得られた。また切削液冷却方法による加工においては、工具回転数と一刃送り量によらず表面粗さはほぼ一定となり、0.1 μm 前後となる結果を得た。



【図6 工具Bで加工した場合の表面粗さ測定結果】

工具Cで加工した場合の表面粗さの結果について図7に示した。一刃送り量が100μmの条件では切削液冷却方法により良好な表面粗さを得たが、一刃送り量が10μm、50μmの条件では工具冷却方法による大きな違いは得られなかった。



【図7 工具Cで加工した場合の表面粗さ測定結果】

2-1-3 工具摩耗の評価

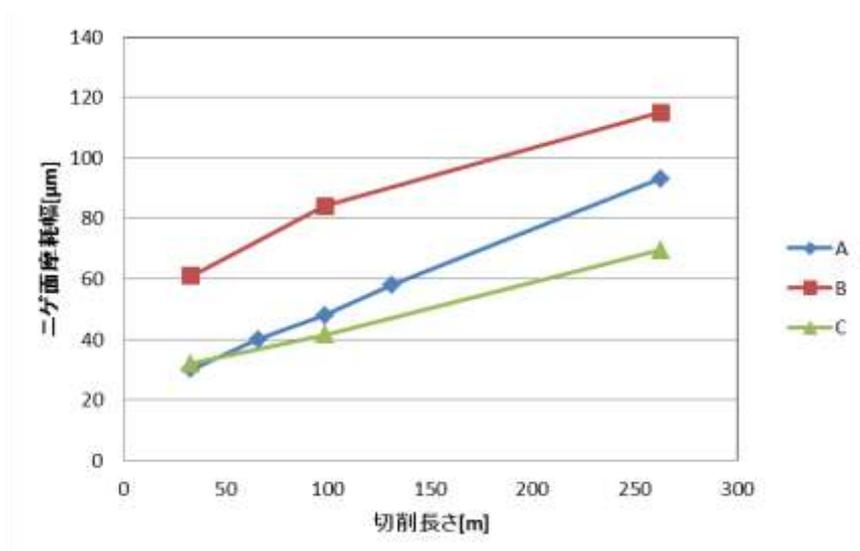
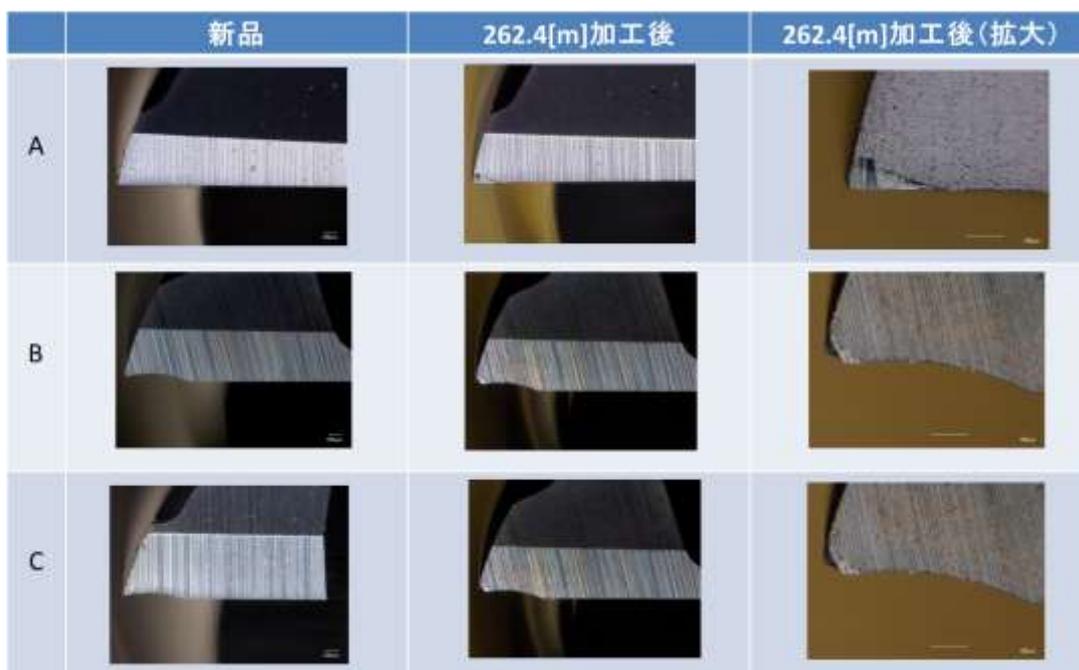
加工方法に関しては前項と同様である。実験は表11に示した加工条件で実施し、一定の切削距離を加工した後に工具のニゲ面、スクイ面の観察を図3に示したマイクロスコープにて行う方法で実施した。摩耗量の評価はニゲ面のコーティングが剥離した箇所を含めた摩耗幅の距離測定を実施することで行った。表12にニゲ面の観察結果を示した。切削距離262.4mmで実験を終了したが、工具Aの摩耗幅が最大となった。工具B、工具Cは摩耗幅は小さいものの、刃先のチッピングが発生している様子が観察された。これは表2の観察結果からも明らかなように、工具B、工具Cは軟材の加工用工具として、切れ味を向上させるために工具の刃先角が小さく設計されているためチッピングの原因になったものと思われる。

図8は工具摩耗量と切削距離について示したものである。切削距離が大きくなるに従いニゲ面摩耗幅も増大する傾向が得られた。工具Bが最も摩耗量が大きくなり、工具Cは最も摩耗量が少なくなる結果となった。特に工具Cは刃先のチッピングが発生しやすい工具でありながらコーティングの効果により摩耗量が最小になったと考えられる。

【表 11 加工条件】

項目	値
主軸回転数[/min.]	20,000
一刃送り量[μm]	100 (送り速度 4,000[mm/min.]
冷却方法	切削液
切り込み量	0.1[mm] ピックフィード 1.0[mm]

【表 12 ニゲ面の観察結果】



【図 8 切削長さとニゲ面摩耗幅の関係】

3 まとめ

無酸素銅の切削加工について、市販工具（A、B、C）を使用し加工後の表面性状、表面粗さ、摩耗状態の調査を行い以下の知見が得られた。

- （1）工具 A が他の工具と比較して加工表面状態が良好となる。
- （2）切削液冷却方法による加工方法がオイルミスト冷却方法よりも鏡面に近い表面状態が得られる。
- （3）表面粗さの最小値は工具 A を使用した場合で工具回転数 20000、一刃送り量 $50 \mu\text{m}$ 、切削液での加工条件にて得られ、 $0.0121[\mu\text{m}]Ra$ を得た。
- （4）工具のニゲ面摩耗幅は工具 C が最小となり摩耗幅の増加量も最小となった。

サブテーマ2 単結晶SiCの研削加工技術

1. 諸 言

物理的及び電気的特性に優れた特性を有する単結晶 SiC 材料が次世代パワーデバイス材料のひとつとして注目されている。単結晶 SiC は硬脆材料であるために高能率な高精度加工が難しく、これまで使用されてきたシリコン材と比べて所望の加工精度を得るまでに高い加工コストを要するなど、その実用化には解決すべき課題が多い。

本研究では単結晶 SiC ウエハを対象に、ダイヤモンド砥石を用いた様々な研削加工条件における研削抵抗値と研削加工面性状を調査したので報告する。

2. 実験方法および条件

表 1 に本実験に用いた研削加工条件を示す。加工対象は 2 インチの 4H-SiC ウエハ (0001) 面 (新日本製鐵(株)製) であり、常圧焼結 SiC ブロックに熱可塑性樹脂を用いて接着固定した。実験には、油静圧式の砥石軸とテーブル案内を搭載し、切込方向の最小設定位置決め分解能が $0.01\ \mu\text{m}$ である超精密 CNC 成形平面研削盤を使用した。図 1 は研削抵抗測定時における加工部の様子である。研削抵抗の測定には水晶圧電型 3 成分動力計を使用した。

表 1 実験条件

被削材	4H-SiC ウエハ, 2 インチ, (0001) 面
加工機	超精密 CNC 研削盤 SGU52SXS4 (ナガセインテグレックス製)
研削砥石	(1) SDC200N75BJ1 (D200-W10mm) (東京ダイヤモンド工具製作所製) (2) SD1000N75BL1 (D200-W10mm) (東京ダイヤモンド工具製作所製) (3) SD2000P100CR (D200-W12mm) (nitolex 製) (4) SD2000L50BL1 (D200-W8mm) (東京ダイヤモンド工具製作所製) (5) SD5000P100CR (D200-W12mm) (nitolex 製) (6) SD5000L50BL1 (D200-W8mm) (東京ダイヤモンド工具製作所製)
砥石周速度 V	600, 800, 1000, 1300m/min
加工プロセス	(a)砥石(1)及び(2) : $1\ \mu\text{m}\times 6$ 回 $\rightarrow 0.5\ \mu\text{m}\times 4$ 回 \rightarrow スパークアウト 3 回 (a)の前加工は砥石(1)で実施 (b)砥石(3), (4), (5), (6) : $0.5\ \mu\text{m}\times 6$ 回 \rightarrow スパークアウト 3 回 (c)砥石(6), V1300m/min の場合のみ $0.5\ \mu\text{m}\times 10$ 回 \rightarrow スパークアウト 3 回 (b), (c)の前加工は砥石(2)で実施.
テーブル速度	左右速度 8m/min 前後速度 50mm/min \rightarrow 最終切り込みおよびスパークアウトに 25mm/min
研削方法	トラバース研削
ツルーイング・ドレッシング	砥石(1)及び(2) : 複合研削砥石, 砥石(3) : GC1000 ブロック, 砥石(4) : GC3000 ブロック, 砥石(5)及び(6) : SUS304 ブロック
研削液	ケミカルソリューションタイプ
動力計	水晶圧電型 3 成分動力計 9257B(KISTLER 製)

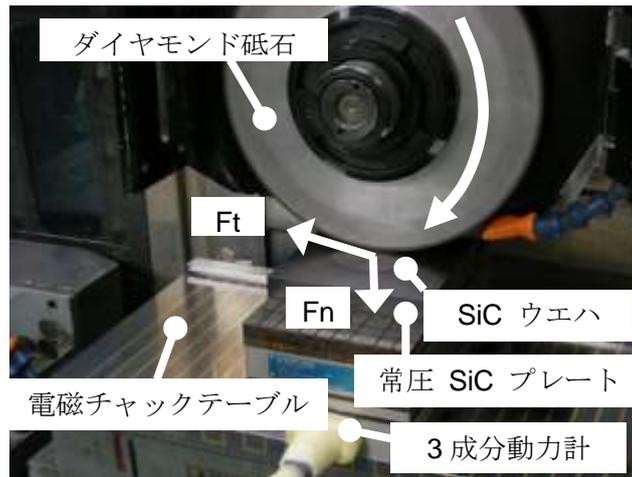


図1 研削抵抗測定時における加工部の様子

3. 実験結果

各研削砥石を使用した場合において砥石周速度を変えて平面研削加工を行い、加工時に被削材に作用する研削抵抗を測定した。なお、被削材への研削砥石の当り位置の検出には法線研削抵抗値 F_n を用いた。ただし、法線研削抵抗値 F_n は砥石周速度の影響を受けやすいため、実験では砥石周速度 800m/min で当て込み作業を行った後、砥石周速度を変えて実験を行った。また、被加工面を表面観察し、表面粗さを測定することで各研削加工条件による被削材への影響を評価した。被加工面の観察には非接触三次元測定機（三鷹光器社製：NH-3SP）の 10 倍及び 100 倍の観察像を、表面粗さの評価には接触式表面粗さ・形状測定機（AMETEK 社製：フォームタリサーフ PGI1250A）を使用した。

表 2～7 に各研削砥石で砥石周速度を変化させた場合の加工時の研削抵抗値と加工面の表面粗さ及び表面観察像を示す。表中の研削抵抗値は単位砥石幅当たりの研削抵抗値であり、今回の実験条件内において研削回数を増加させた場合に研削抵抗値がほぼ一定であったものは平均化した値とし、研削回数を増加させると研削抵抗が増加した SD5000L50BL1 の場合は最終切込み時に得られた最大値（max）とした。なお、砥石 SD5000L50BL1 の場合に砥石周速度 1300m/min で加工プロセス（b）を実施したが、被加工面に加工痕が確認できなかったため、参考までに更に切り込みを増加させた加工プロセス(c)の結果を示した。

表 2 の SDC200N75BJ1 を使用した場合の結果から、高速な砥石周速度ほど法線研削抵抗及び接線研削抵抗は低下し、砥石周速度 1300m/min で最小となった。これは、粗粒度砥石では高速な砥石周速度であれば砥石の切れ味が向上するためであると考えられる。また、表面粗さ R_a は全ての砥石周速度で $0.3\mu\text{m}R_a$ 程度であった。加工面を観察すると高速な砥石周速度の場合に破砕が減少する傾向が見られ、砥石周速度 1300m/min で最も少なくなった。

表 3 の SD1000N75BL1 を使用した場合の結果から、法線研削抵抗は高速な砥石周速度ほど上昇して砥石周速度 1300m/min で最大となったが、接線研削抵抗は高速な砥石周速度ほど低下し砥石周速度 1300m/min で最小となった。また、表面粗さ R_a は全ての砥石周速度で $0.04\mu\text{m}R_a$ 程度であった。加工面を観察すると高速な砥石周速度の方がやや破砕が少なくなる傾向が見られ、砥石周速度 1300m/min で最も少なくなった。

表 4 の SD2000P100CR を使用した場合の結果から、法線研削抵抗は高速な砥石周速度ほど上昇して砥石周速度 1300m/min で最大となったが、接線研削抵抗は高速な砥石周速度ほど低下し砥石

周速度 1300m/min で最小となった。また、表面粗さ Ra は全ての砥石周速度で 0.05 μ m 程度であった。加工面を観察すると高速な砥石周速度の方がやや破砕が少なくなる傾向が見られ、砥石周速度 1300m/min で最も少なくなった。

表 5 の SD2000L50BL1 を使用した場合の結果から、法線研削抵抗は砥石周速度 10000m/min まではほぼ同じであったが、砥石周速度 1300m/min で最小となった。これは、#2000 程度の微粒レジノイドボンド砥石の場合には、砥石周速度が過度に高速であれば研削砥石の上滑り現象が発生するためであると考えられる。接線研削抵抗は高速な砥石周速度ほど低下し砥石周速度 1300m/min で最小となった。また、表面粗さ Ra は全ての砥石周速度で 0.03 μ mRa 程度であった。加工面を観察すると高速な砥石周速度の方がやや破砕が少ない傾向が見られ、砥石周速度 1300m/min で最も少なくなった。

表 6 の SD5000P100CR を使用した場合の結果から、法線研削抵抗は高速な砥石周速度ほど上昇して砥石周速度 1300m/min で最大となったが、接線研削抵抗は高速な砥石周速度ほど低下し砥石周速度 1300m/min で最小となった。また、表面粗さ Ra は全ての砥石周速度で 0.02 μ m 程度であった。加工面を観察すると高速な砥石周速度の方がやや破砕が少ない傾向が見られ、砥石周速度 1300m/min で最も少なくなった。

表 7 の SD5000L50BL1 を使用した場合の結果から、法線研削抵抗は高速な砥石周速度ほど低下し、砥石周速度 1000m/min で最小となった。さらに、砥石周速度 1300m/min の場合には更に切り込みを増加させなければ加工ができなかった。これは、超微粒レジノイドボンド砥石の場合には、SD2000L50BL1 の場合と同様に砥石周速度が過度に高速であれば研削砥石の上滑り現象が発生するためであると考えられる。接線研削抵抗は高速な砥石周速度ほど低下し砥石周速度 1000m/min で最小となった。また、表面粗さ Ra は全ての砥石周速度で 0.01 μ m 程度であった。加工面を観察するとこれまで使用した砥石と比較して破砕が大幅に減少し、特に低速な砥石周速度の方がやや破砕が少ない傾向が見られ、砥石周速度 600m/min で最も少なくなった。

4. 結 言

単結晶 SiC を様々な砥石で加工した本研究により以下のことが明らかになった。

- (1) 砥石 SDC200N75BJ1 による平面研削では、研削抵抗は砥石周速度 1300m/min で法線及び接線方向ともに最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ 0.3 μ mRa が得られる。破砕は砥石周速度 1300m/min で最も少なくなった。
- (2) 砥石 SD1000N75BL1 による平面研削では、研削抵抗は砥石周速度 1300m/min で法線方向が最大、接線方向は最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ 0.04 μ mRa が得られる。破砕は砥石周速度 1300m/min で最も少なくなった。
- (3) 砥石 SD2000P100CR による平面研削では、研削抵抗は砥石周速度 1300m/min で法線方向が最大、接線方向は最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ 0.05 μ mRa が得られる。破砕は砥石周速度 1300m/min で最も少なくなった。
- (4) 砥石 SD2000L50BL1 による平面研削では、研削抵抗は砥石周速度 1300m/min で法線及び接線方向とも最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ 0.03 μ mRa が得られる。破砕は砥石周速度 1300m/min で最も少なくなった。
- (5) 砥石 SD5000P100CR による平面研削では、研削抵抗は砥石周速度 1300m/min で法線方向が最大、接線方向は最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ 0.02 μ mRa が得られる。破砕

は砥石周速度 1300m/min で最も少なくなった。

(6) 砥石 SD5000L50BL1 による平面研削では、研削抵抗は砥石周速度 1000m/min で法線方向が最大、接線方向は最小となった。砥石周速度に因らず表面粗さ $0.01\mu\text{mRa}$ が得られる。破碎は砥石周速度 600m/min で最も少なくなった。

表 2 砥石 SDC200N75BJ1 による平面研削加工結果

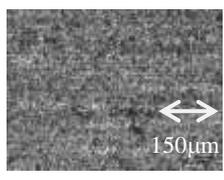
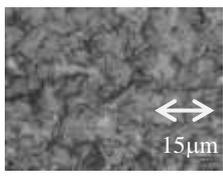
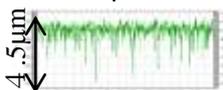
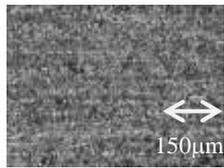
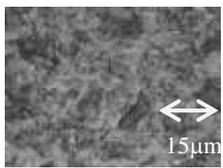
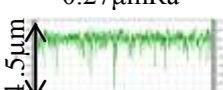
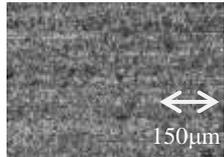
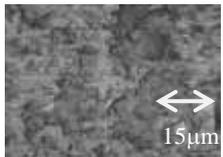
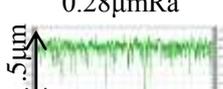
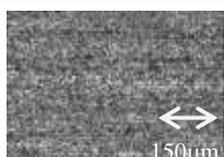
砥石周速度 m/min	研削抵抗 N/mm	表面粗さ	加工面の表面観察画像 (10 倍)	加工面の表面観察画像 (100 倍)
600	Fn : 1.16 Ft : 0.31	2.77 μmRz 0.29 μmRa 		
800	Fn : 1.20 Ft : 0.15	2.98 μmRz 0.30 μmRa 		
1000	Fn : 1.04 Ft : 0.14	2.70 μmRz 0.27 μmRa 		
1300	Fn : 0.88 Ft : 0.07	2.72 μmRz 0.28 μmRa 		

表3 砥石 SD1000N75BL1 による平面研削加工結果

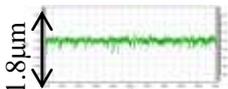
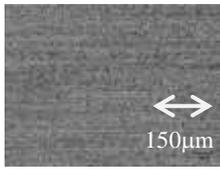
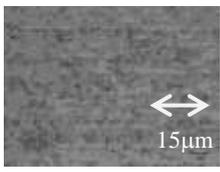
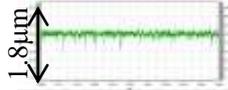
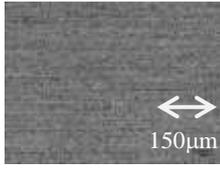
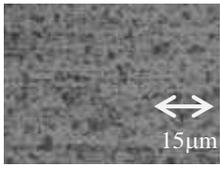
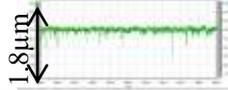
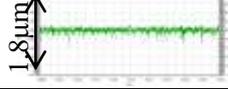
砥石周速度 m/min	研削抵抗 N/mm	表面粗さ	加工面の表面観察画像 (10倍)	加工面の表面観察画像 (100倍)
600	Fn : 2.49 Ft : 0.42	0.43 μ mRz 0.04 μ mRa 		
800	Fn : 2.18 Ft : 0.25	0.46 μ mRz 0.04 μ mRa 		
1000	Fn : 2.89 Ft : 0.27	0.55 μ mRz 0.04 μ mRa 		
1300	Fn : 3.04 Ft : 0.21	0.39 μ mRz 0.04 μ mRa 		

表4 砥石 SD2000P100CR による平面研削加工結果

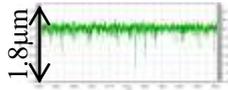
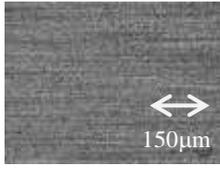
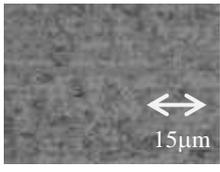
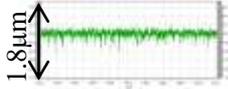
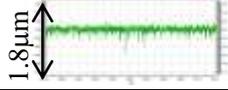
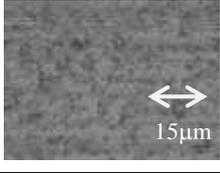
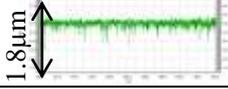
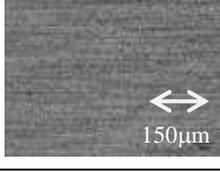
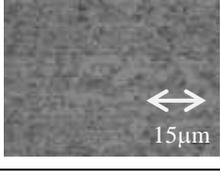
砥石周速度 m/min	研削抵抗 N/mm	表面粗さ	加工面の表面観察画像 (10倍)	加工面の表面観察画像 (100倍)
600	Fn : 0.60 Ft : 0.14	0.76 μ mRz 0.06 μ mRa 		
800	Fn : 0.61 Ft : 0.08	0.54 μ mRz 0.05 μ mRa 		
1000	Fn : 0.75 Ft : 0.07	0.49 μ mRz 0.05 μ mRa 		
1300	Fn : 0.92 Ft : 0.03	0.64 μ mRz 0.05 μ mRa 		

表5 砥石 SD2000L50BL1 による平面研削加工結果

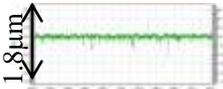
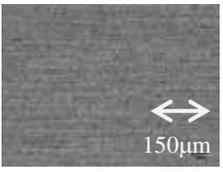
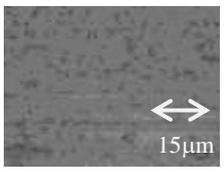
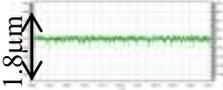
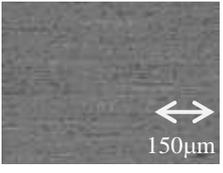
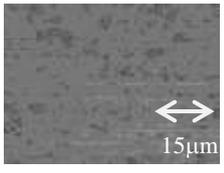
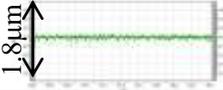
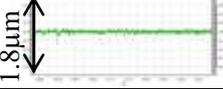
砥石周速度 m/min	研削抵抗 N/mm	表面粗さ	加工面の表面観察画像 (10倍)	加工面の表面観察画像 (100倍)
600	Fn : 2.53 Ft : 0.43	0.37 μ mRz 0.03 μ mRa 		
800	Fn : 2.48 Ft : 0.26	0.29 μ mRz 0.03 μ mRa 		
1000	Fn : 2.64 Ft : 0.19	0.24 μ mRz 0.02 μ mRa 		
1300	Fn : 2.21 Ft : 0.04	0.21 μ mRz 0.02 μ mRa 		

表6 砥石 SD5000P100CR による平面研削加工結果

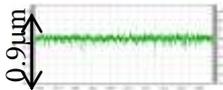
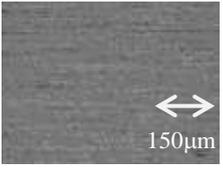
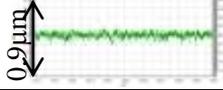
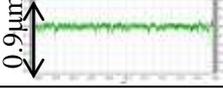
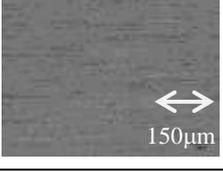
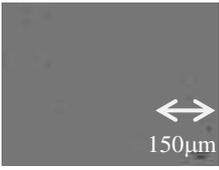
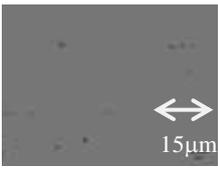
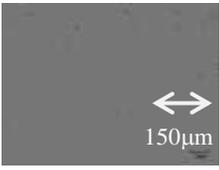
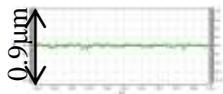
砥石周速度 m/min	研削抵抗 N/mm	表面粗さ	加工面の表面観察画像 (10倍)	加工面の表面観察画像 (100倍)
600	Fn : 1.58 Ft : 0.26	0.21 μ mRz 0.02 μ mRa 		
800	Fn : 1.61 Ft : 0.16	0.19 μ mRz 0.02 μ mRa 		
1000	Fn : 2.29 Ft : 0.14	0.19 μ mRz 0.02 μ mRa 		
1300	Fn : 2.63 Ft : 0.02	0.18 μ mRz 0.02 μ mRa 		

表7 砥石 SD5000L50BL1 による平面研削加工結果

砥石周速度 m/min	研削抵抗 N/mm	表面粗さ	加工面の表面観察画像 (10 倍)	加工面の表面観察画像 (100 倍)
600	Fn(max) : 8.17 Ft(max) : 1.06	0.12 μ mRz 0.01 μ mRa 		
800	Fn(max) : 5.37 Ft(max) : 0.78	0.10 μ mRz 0.01 μ mRa 		
1000	Fn(max) : 5.65 Ft(max) : 0.57	0.08 μ mRz 0.01 μ mRa 		
1300 (参考:加工プロセス (c))	Fn(max) : 3.21 Ft(max) : 0.14	0.08 μ mRz 0.01 μ mRa 		

「超硬合金の切削加工技術」調査

山形県工業技術センター 江端 潔, 村岡潤一

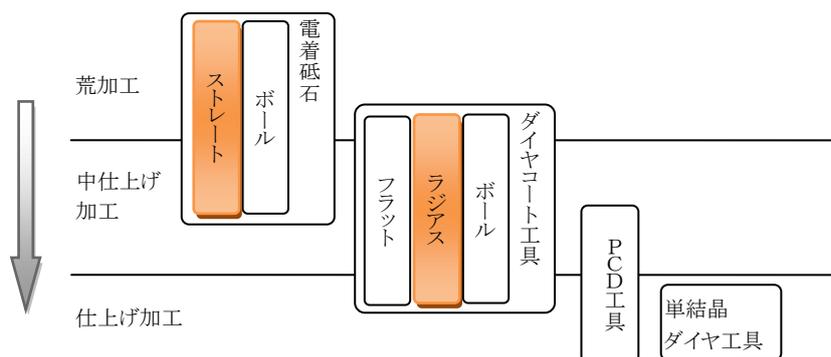
1. 緒言

超硬合金は、耐摩耗性を要する工具や金型等に用いられる。高硬度であるが、平面や2次元形状等であれば、研削で比較的容易に加工できる。しかし、複雑な凹形状や微細形状は放電加工によらざるを得ず、電極加工とみがき仕上げが、低コスト、短納期、精度向上の妨げとなっている。

一方、近年のダイヤモンド工具の進歩に伴って、ミーリングマシンによる超硬合金の切削加工事例が紹介され始めている。超硬合金加工用のミーリング工具としては、軸付電着ダイヤモンド砥石(以下、電着砥石)、ダイヤモンドコーティングエンドミル(以下、ダイヤモンド工具)、ダイヤモンド焼結体エンドミル(以下、PCD 工具)、単結晶ダイヤモンドエンドミル(以下、単結晶ダイヤモンド工具)等が知られているが、高い加工能率と加工精度、加工面品位、ならびに低コストといった要求をすべて満たす工具はないため、荒加工から仕上げ加工までの工程ごとに、適正な工具と加工条件を選定しなければならない。しかし、加工条件を選ぶときに参考となる公表データがまだまだ少ないことが実用化の妨げになっている。

そこで本調査において、荒加工に適するとされる電着砥石と、中仕上げ加工に適するとされるダイヤモンド工具を対象に、適正条件を調べた。これを実験1と呼ぶ。超硬合金用ミーリング工具の種類と一般的用途、ならびに本調査の供試工具(着色部)を図 1-1 に示す。本調査で調べることができなかった図1-1 中の他の工具については、本県において継続して調査していく予定である。

実験1では、VM-30 (CIS規格019D-2005の材種分類番号)を被削材としたが、超硬合金は材種によって被削性が異なるはずであり、なかには VM-30 の適正加工条件では削ることができないものがある可能性がある。そのため、各材種の被削性を把握することが、材種ごとに切削加工の実用性を見極めていくうえで重要となる。そこで、実験1で調べた VM-30 の適正加工条件で複数の材種を加工し、被削性(工具摩耗、切削抵抗等)を比較した。これを実験2と呼ぶ。



【図 1-1 超硬合金用切削工具の種類と本調査の対象】

2. 被削材

軽負荷の絞りダイから重負荷のヘッダーダイまでの多様な金型を想定し、(株)片桐製作所(山形県上山市)が製造販売している超硬合金の中から、8種類の材種を被削材に選定した。そのうち、実験1ではVM-30のみを、実験2では8種類すべてを対象とした。

3. 供試工具

微細な角溝や底面が平らなポケット形状といった比較的単純な形状を、放電加工等で創成している企業は少なくない。これらの形状を切削で創成する技術を確認することができれば、複雑な3次元形状にもすみやかに応用できることが期待される。そこで本調査では、フラット、ラジラス、ボール、総型等といった多様な工具のなかから、まずはストレート砥石とラジラスエンドミルを選定し、溝とポケット形状を加工することにした。

荒加工には、低価格で加工能率が高い粗粒電着砥石が適していると考え、粒度#100の電着砥石を選定した。メーカーは(株)ギヤマン(滋賀県)である。工具径は小径の3mmと4mmにした。これは、除去体積が大きい形状加工であっても、焼成前加工や放電加工によってニア形状まで加工したのちに、切削で精密に加工するのが現実的であるためである。

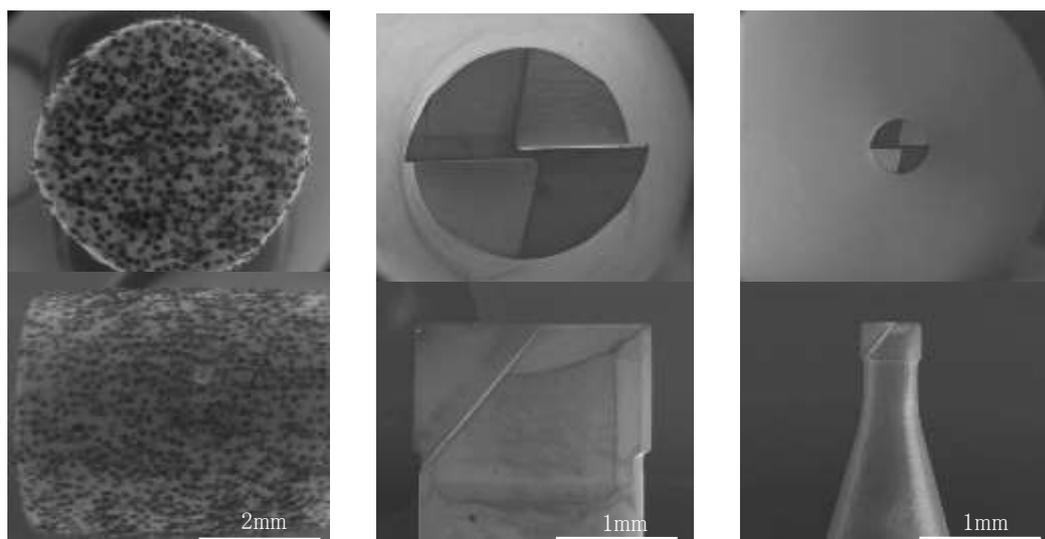
中仕上げ加工には、加工精度が高く、PCD工具や単結晶ダイヤモンド工具よりも安価とされるダイヤモンド工具が適すると考えられる。ダイヤモンド工具は複数のメーカーから販売されているが、深切込みが可能と公表されているのは、ユニオンツール株式会社製のものだけである(25年1月末現在)。そこで、同社製のダイヤモンドコートラジラスエンドミル UDCLRを選定した。電着砥石での荒加工ののちに中仕上げを行う場合と、電着砥石では加工できない微細形状を直接加工する場合とを想定し、その工具径をそれぞれ2mm、0.5mmとした。工具の仕様を表3-1に、SEM写真を図3-1に示す。

【表 3-1 供試工具の仕様】

単位:mm

分類	製造者	外径	コーナR	刃(電着)長	有効長	シャンク径	砥粒	母材	単価※
軸付電着砥石	ギヤマン	(3)	—	5	—	3	SD100	超硬合金	2千円
		(4)	—	5	—	4	SD100	超硬合金	2千円
ダイヤモンドコートラジラスエンドミル	ユニオンツール	2	0.05	0.25	2.0	4	—	超硬合金	20千円
		0.5	0.05	1	0.5	4	—	超硬合金	20千円

※10本単位の見積金額の例(平成25年1月現在)。諸条件によって異なるため、あくまで目安。



4mmD 軸付電着砥石

2mmD ダイヤコートエンドミル

0.5mmD ダイヤコートエンドミル

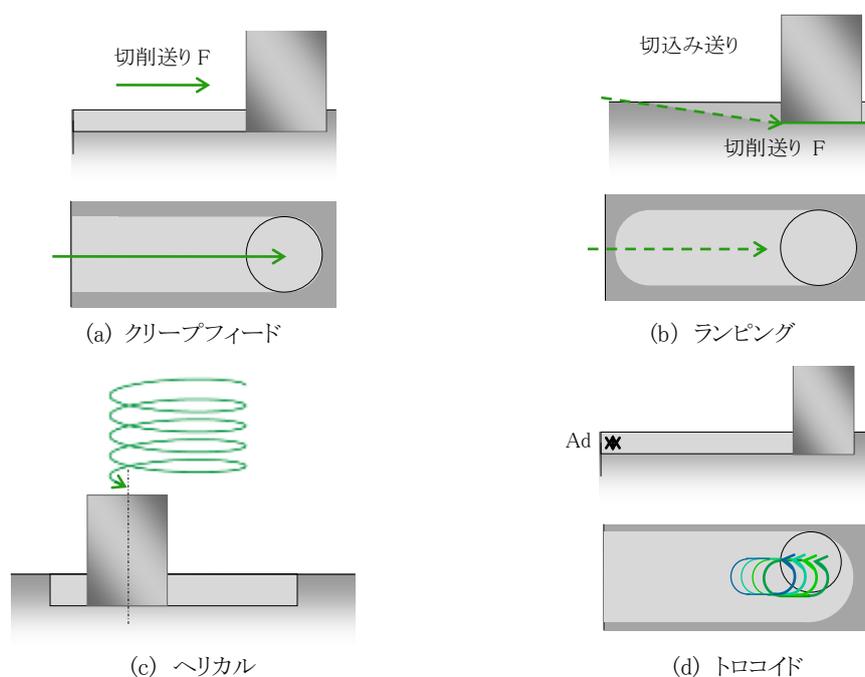
【図 3-1 供試工具】

4. ツールパス(工具経路)

ミーリングのツールパスには、溝加工(クリープフィード)、ランピング、ヘリカル、トロコイド、等高線加工(軸方向浅切込み)、側面加工(半径方向浅切込み)等がある。ランピングとヘリカルは切込みに、それ以外は切込み後の形状創成に用いられることが多い。本調査では、クリープフィード、ランピング、ヘリカル、トロコイドの4つについて調査する。

本報でのクリープフィード(図 4-1(a))とは、Z 軸を固定したまま X・Y 軸の補間動作によって、工具と同じ幅の溝を加工するパスをいう。ランピング(同図(b))は、クリープフィードにZ軸を同期させ、切削速度が低い工具中心ができるだけ切削に作用しないように、被削材に対して斜めに切り込むパスである。このツールパスを螺旋状にしたものがヘリカル(同図(c))で、X・Y軸の円運動(以下、揺動と呼ぶ。)にZ軸を同期させ、螺旋の動きを繰り返しながら穴を連続加工する。トロコイド(同図(d))は揺動と直線補間を組み合わせたような溝加工用のパスである。

工具と実験項目の組み合わせを表 4-1 に示す。なお、その他のツールパスについては、本県において継続して調査していく予定である。



【図 4-1 ツールパス】

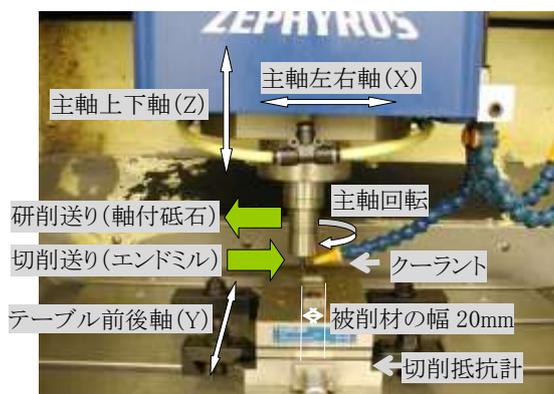
【表 4-1 工具と実験項目の組み合わせ】

工具径 D mm	実験 1				実験 2
	クリープ フィード	ランピング	ヘリカル	トロコイド	
3mmD 軸付電着砥石	—	—	—	○	—
4mmD 軸付電着砥石	○	—	○	—	—
2mmD ダイヤコートエンドミル	○	○	○	—	○
0.5mmD ダイヤコートエンドミル	○	○	○	—	—

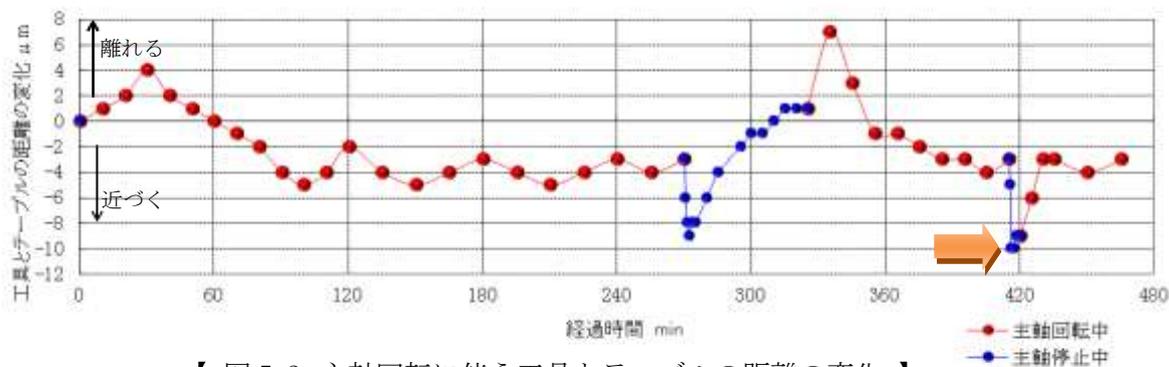
5. 加工機

実験には縦型ミーリングマシン(東芝機械製 F-MACH442)を用いた. 加工中の写真を図 5-1 に示す.

主軸を 40000rev/min で回転させたときの, 工具とテーブルの距離の継時変化を図 5-2 に示す. 同図から, 刃先位置が安定するのに 90 分を要すること, 安定後も約 $2\mu\text{m}$ の変動があること, 主軸停止直後に急速に主軸が伸びること, ならびに主軸停止後 5 分以内に回転を再開すれば 10 分以内に再び安定することがわかる. そこで本実験では 90 分間のならし運転を行うこと, ならびに工具交換や刃先位置測定は 5 分以内に終え, その後に 10 分間のドウェルを行うことの2点をこころがけた.



【図 5-1 加工機】

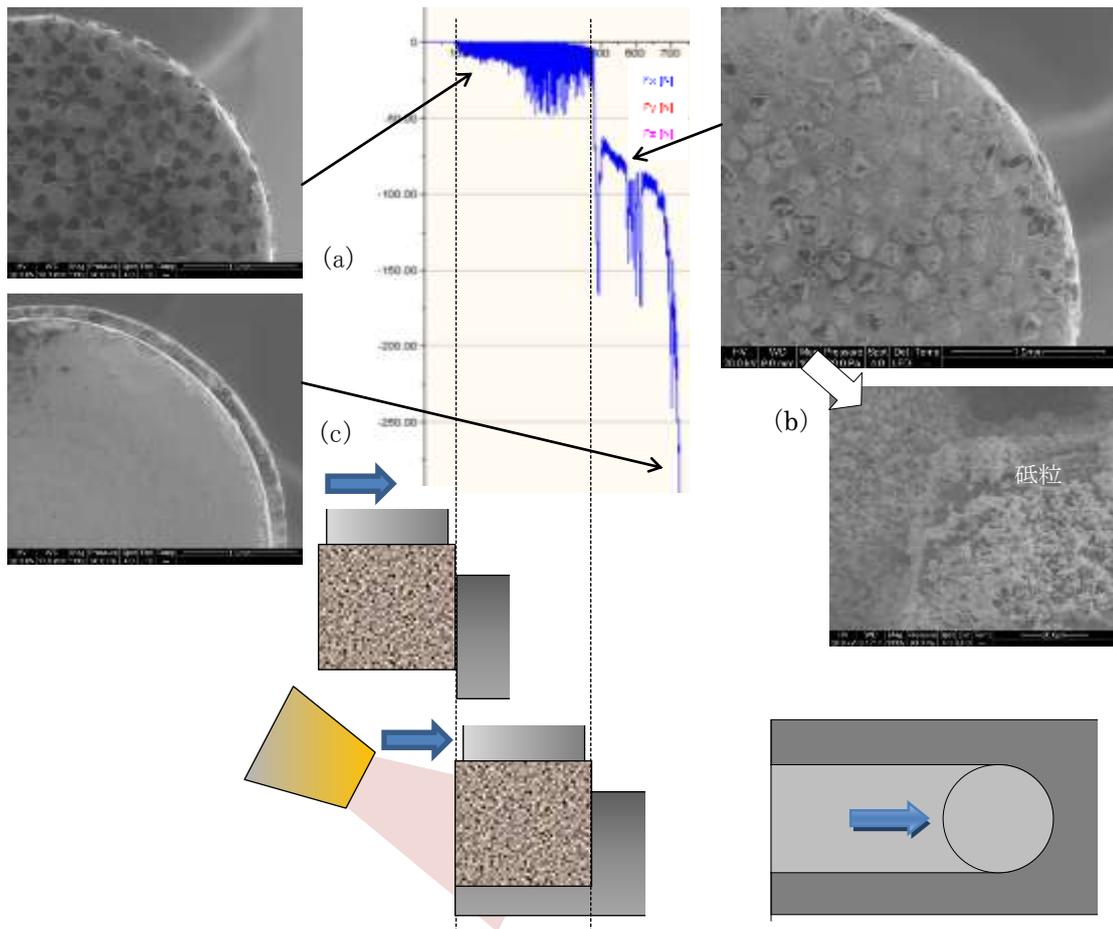


【 図 5-2 主軸回転に伴う工具とテーブルの距離の変化 】

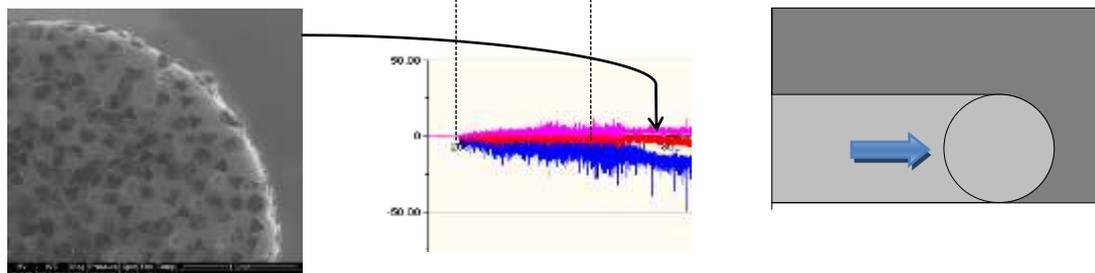
6. 実験方法及び結果(実験1) — 軸付電着砥石 —

6-1. 実験1-1 クリープフィード

4mmD 電着砥石でクリープフィード溝加工を試みた。加工条件は、底面の砥粒に摩耗が集中することを避ける目的で深切込み低送りとし、切込み深さを 3mm に、送り速度を 0.5mm/min に設定した。主軸回転数は 20000rev/min とした。この場合、研削抵抗 3 成分のうちでは、送り方向成分が最大となる。切削抵抗送り方向成分と工具損傷の変化を図 6-1-1 に示す。また、溝を加工する位置を被削材のエッジまでずらしたときの、切削抵抗送り方向成分と工具損傷の変化を図 6-1-2 に示す。



【 図 6-1-1 クリープフィード(1) 切削抵抗送り成分と工具損傷 】



【 図 6-1-2 クリープフィード(2) 切削抵抗送り成分と工具損傷 】

図 6-1-1 から、砥石が被削材に完全に切り込んだのち、急激に目詰まりが生じ((b)), めっき層の剥離に至ったことがわかる((c)). 一方、図 6-1-2 では、図 6-1-1 と同じ加工能率であるにもかかわらず、砥石のエッジに目こぼれがみられるものの、良好な切れ味を維持している. これは、同図のほうが研削点へ研削液が届きやすく、切りくずの排出性と冷却性に優れるためと考えられる.

以上の結果から、電着砥石に対しては深切込み低送りによるクリープフィード溝加工が現実的ではないこと、ならびに研削液の供給がきわめて重要であることがわかった.

6-2. 実験1-3 ヘリカル

直径 5.5×深さ 3mm の止まり穴を、ヘリカルパスにステップフィード(イニシャル点復帰)を組み合わせることで、#100 電着砥石 1 本で加工することができた. 用いた適正加工条件は表 6-2 のとおりである.

1ステップ内の研削抵抗の変化を図 6-2-1 に示す. 3成分中では軸方向が最大となっている.

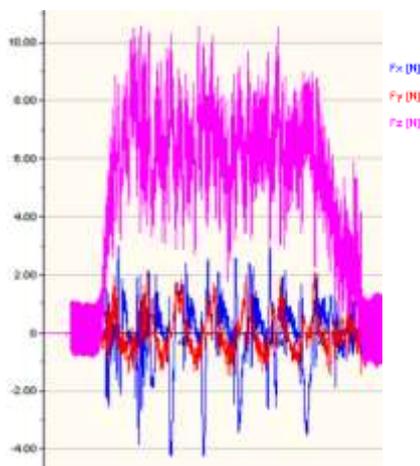
加工後の砥石作業面(図 6-2-2)を見ると、外側ほど砥粒が摩滅するが、内側は外側ほど研削に作用しないことがわかる. このことから、ヘリカルパスの場合、中心部に砥粒は不要と考えられる.

加工深さと研削抵抗の関係を図 6-2-3 に示す. 加工に伴って砥石が摩耗し、研削抵抗が増大している.

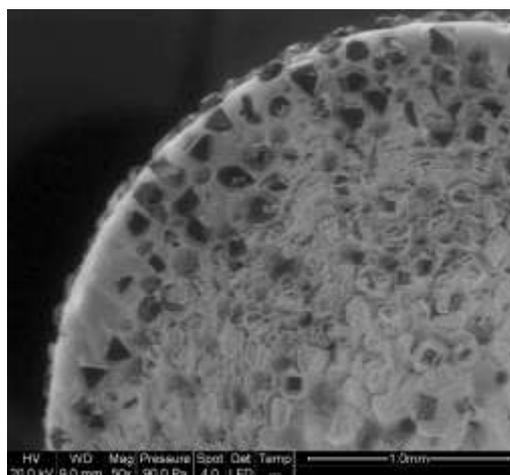
なお、適正条件加工条件は、表 6-2 の加工条件のうち、主軸回転数と送り速度を図 6-2-4 のように変化させ、得られた研削抵抗値をもとに、加工能率も考慮して定めた.

【表 6-2 ヘリカル加工条件】

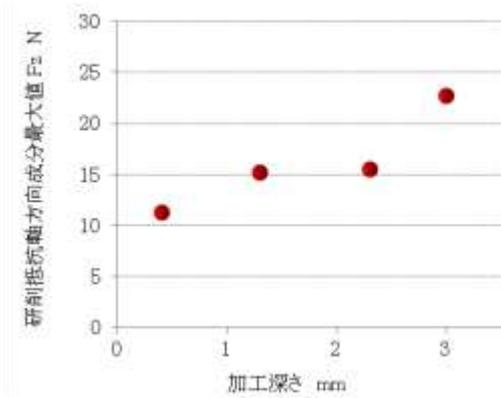
工具径 D mm	4
主軸回転数 N rev/min	60000
送り速度 F mm/min	200(ダウンカット)
揺動半径 mm	0.75
ステップ幅 mm	0.05
揺動 1 回転あたりの切込み深さ mm	0.0075
クーラント	ソリューション



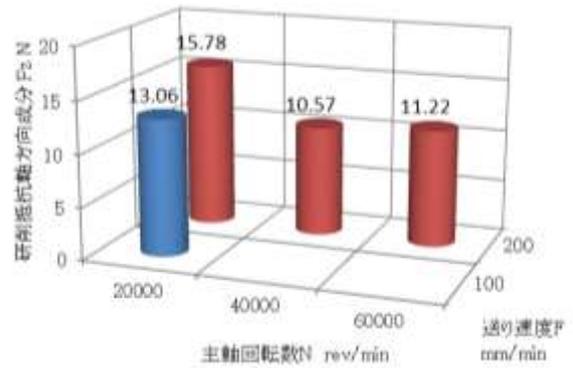
【 図 6-2-1 ヘリカル 研削抵抗 】



【 図 6-2-2 ヘリカル 工具損傷 】



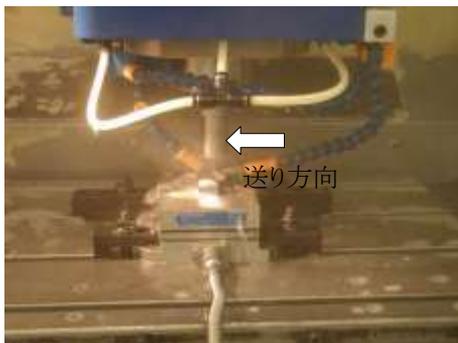
【 図 6-2-3 ヘリカル 研削抵抗の変化 】



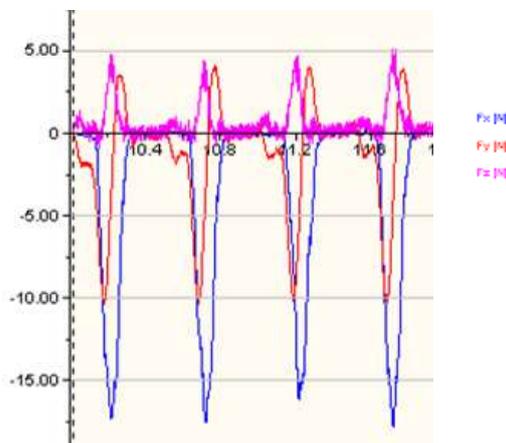
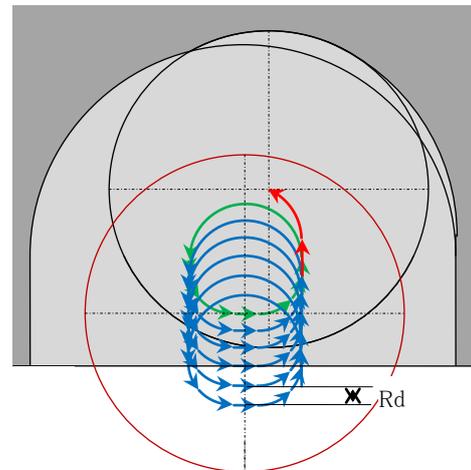
【 図 6-2-4 加工条件と研削抵抗 】

6-3. 実験1-4 トロコイド

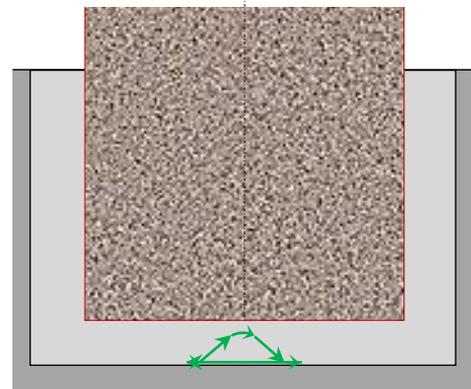
クリープフィードパスでは加工できなかった幅 4×深さ3mm の溝を、トロコイドパスにより、3mmD の#100 電着砥石 1 本で 15mm (総除去量 199mm³)加工することができた。研削液は、図 6-3-1 のように前後から供給した。そのときの研削抵抗を図 6-3-2 に示す。3成分中では、溝加工方向の成分(F_x)が最大となっている。図 6-3-3 にはトロコイドパスを示す。切りくず排出性と冷却性を高める目的で、非切削時(後退時)には工具と被削材を離すようにした。



【 図 6-3-1 トロコイド 研削液の供給 】

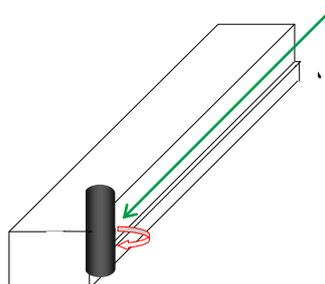


【 図 6-3-2 トロコイド 研削抵抗 】



【 図 6-3-3 トロコイドパス 】

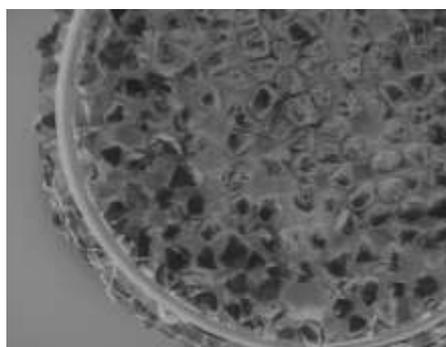
加工条件は以下の手順で定めた。まず、メーカー推奨条件を参考に側面加工(図 6-3-4)を行い、研削音と研削面から適正な加工条件であると判断した。その主軸回転数と送り速度、半径方向切込み量をそのまま適用したのが表 6-2 のトロコイド(1)である。一方、フライスモデル¹⁾における最大砥粒切込み深さと砥粒切削長を、側面加工と同じにしたのがトロコイド(2)である。軸方向切込み深さ 1mm で加工したところ、トロコイド(1)では 16mm(除去面積 70mm²)で工具寿命に至った。図 6-3-5(a)からは、エッジの砥粒がめっき層ごと剥離したことがわかる。一方、トロコイド(2)では 20mm(除去面積 80mm²)を問題なく加工することができた。図 6-3-5(b)からは、底面、側面ともに砥粒の脱落は少なく、砥粒先端が徐々に摩滅平坦化していったことがわかる。前述した幅 4×深さ 3mm の溝を 15mm(総除去量 199mm³)加工した後の砥石作業面を図 6-3-6 に示す。底面、側面ともにエッジに近づくほど、砥粒が摩滅していることがわかる。



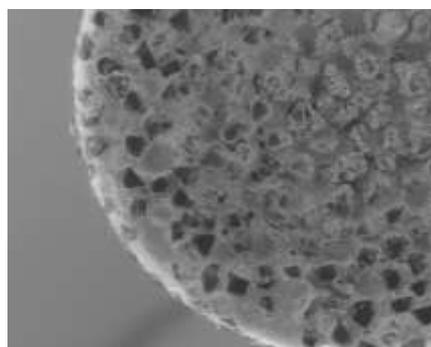
【 図 6-3-4 側面加工 】

【表 6-2 ヘリカル加工条件】

	側面加工	トロコイド(1)	トロコイド(2)
工具径 D mm	3		
加工溝幅 d mm	-	4	
主軸回転数 N rev/min	60000		40000
送り速度(指令) F mm/min	400		1000
最大半径方向切込み量 Rd mm	0.02		0.005
砥石外周面の最大砥粒切込み深さ g_m μ m ※a は連続切れ刃間隔	0.12a	0.06a	0.14a
砥石外周面の砥粒切削長 l_c mm	0.24	0.49	0.24

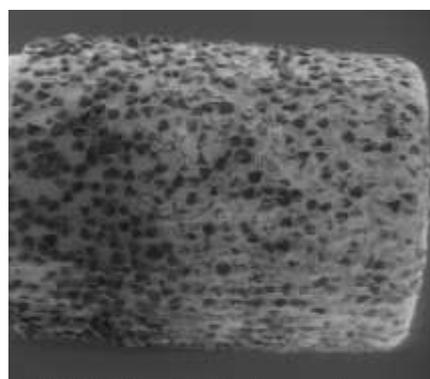
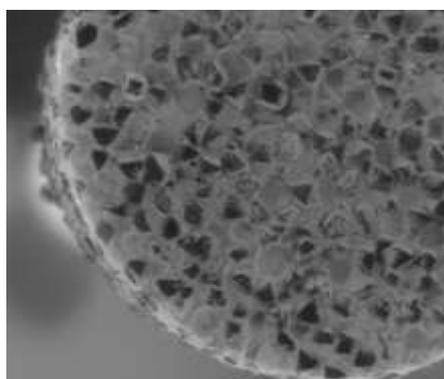


(a) トロコイド(1) 条件 16mm(70mm²)



(b) トロコイド(2) 条件 20mm(80mm²)

【 図 6-3-5 砥石作業面 幅 4×深さ 1mm 加工後 】



【 図 6-3-6 砥石作業面 幅 4×深さ 3×15mm 加工後 】

7. 実験方法及び結果(実験1) — ダイヤコートエンドミル —

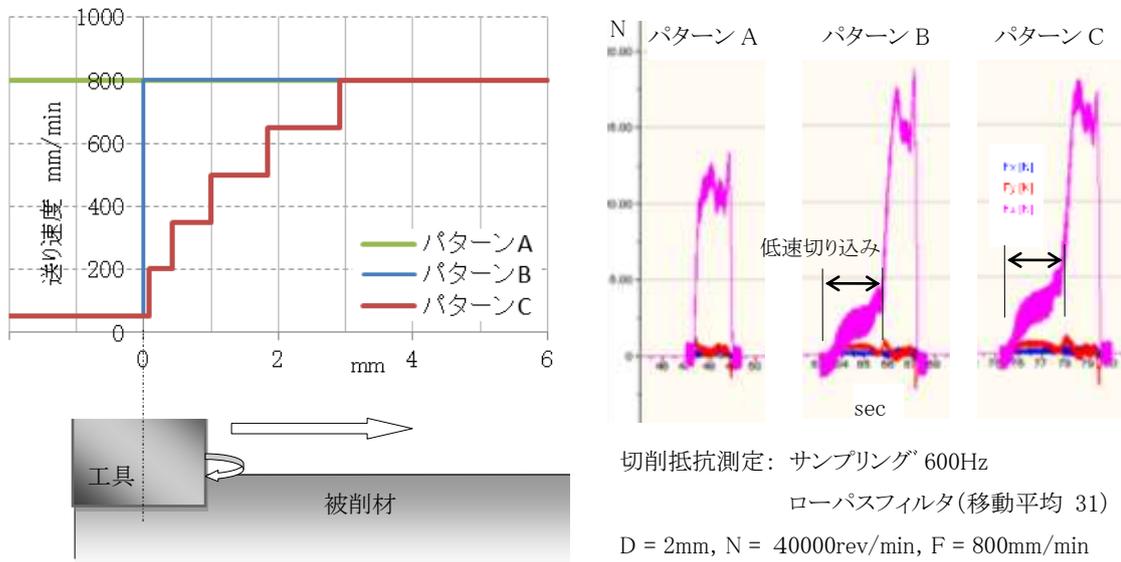
7-1. 実験1-1 クリープフィード

7-1-1. 適正加工条件

ダイヤコート工具によるクリープフィード溝加工の適正条件を調べた。

切込み時の工具損傷が懸念されたため、実験に先立ち、図 7-1-1 に示す複数の切込み・加速パターンを試し、切削抵抗を比較したところ、低速切込みパターン B・C と、切込み時の同速で切り込むパターン A のいずれにも、切込み時にピークが認められなかった。そこで、切込み用の低速送りは設定しないことにした(パターン A)。なお、3 分力のうちでは軸方向成分が最も大きい。

その後、1 刃当たりの送りを刃径 D の 0.5% に、単位時間当たりの除去量(加工能率)を D^3 に固定し、主軸回転数を 10000~50000rev/min で変化させて、切削抵抗と溝底面の粗さ(触針式)を調べた。この場合、主軸回転数が高いほど、浅切込み・高送りとなる。実験条件を表 7-1-1 に示す。

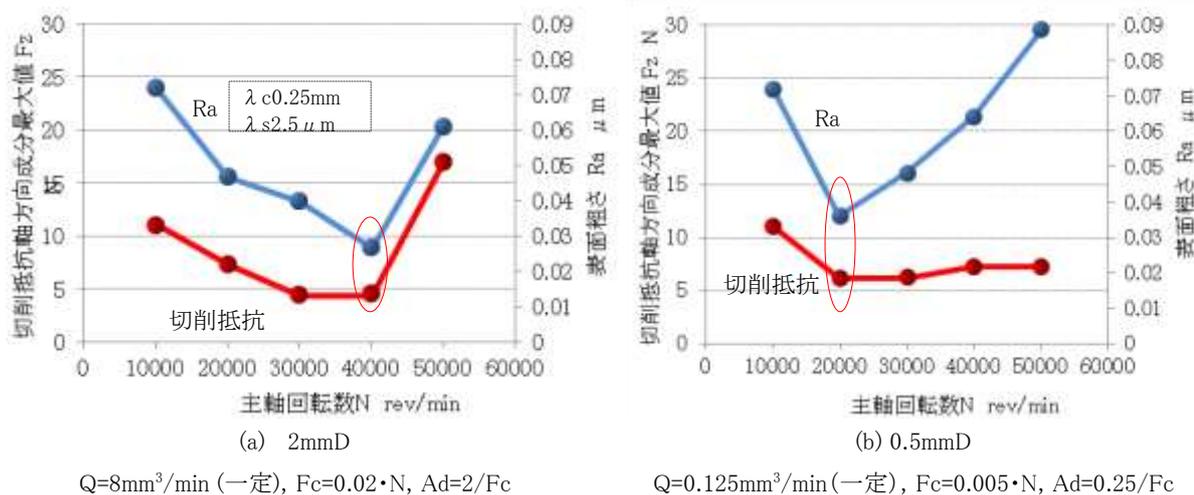


【図 7-1-1 加速パターン(左)と切削抵抗(右)の関係 (F=800)】

【表 7-1-1 実験条件 実験1-1 ダイヤコート工具】

工具径 D mm	D	2					0.5				
1 刃当たりの送り f mm/(rev・刃)	0.005D	0.010					0.0025				
加工能率 Q mm ³ /min	D ³	8					0.125				
主軸回転数 N rev/min		10000	20000	30000	40000	50000	10000	20000	30000	40000	50000
送り速度 F mm/min	2f・N	200	400	600	800	1000	50	100	150	200	250
切込み深さ Ad mm	Q/D/F	0.0200	0.0100	0.0066	0.0050	0.0040	0.0050	0.0025	0.0017	0.0013	0.0010
クーラント		エアブロー									

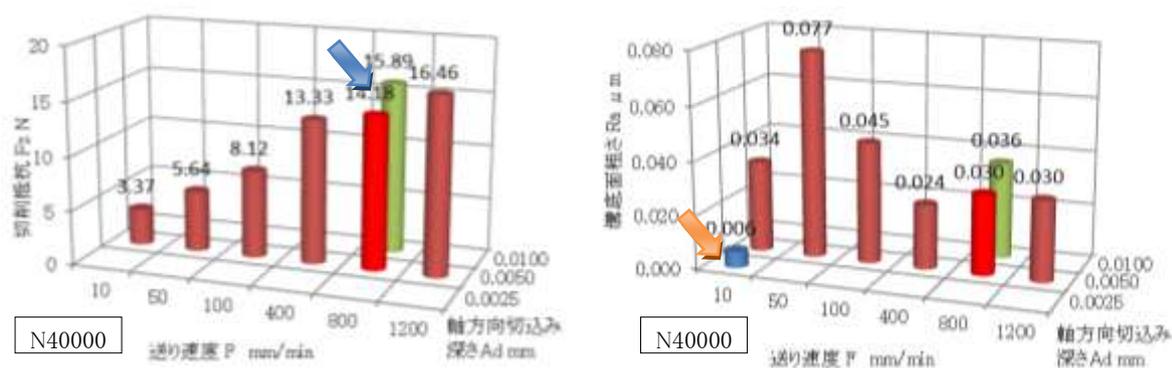
得られた主軸回転数と切削抵抗, 表面粗さの関係を図 7-1-2 に示す. 2mmD 工具では N40000・Fc800・Ad0.005 の組み合わせのときに, 0.5mmD 工具では N20000・Fc100・Ad0.0025 の組み合わせのときに, 切削抵抗・溝底面粗さともに最小となった.



【図 7-1-2 加工条件と切削抵抗, 表面粗さの関係(1)】

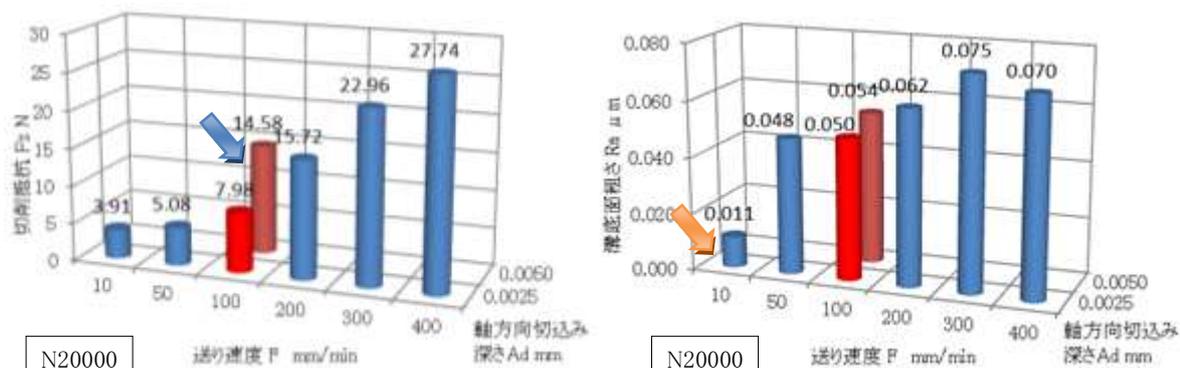
さらに, その加工条件(図 7-1-3, 4 中の赤棒)をもとに, 送り速度 F と切込み深さ A_d を変化させ, そのときの切削抵抗と溝底面粗さを調べた.

図 7-1-3 の左図は, 2mmD 工具の加工条件と切削抵抗の関係を表す. 青矢印で示した条件は, 加工能率が赤棒の条件の 2 倍であるにもかかわらず, 切削抵抗がそれほど大きくない. そこで, これを能率重視の加工条件とした. 右図には, 加工条件と溝底面粗さの関係を表す. 橙矢印で示す表面粗さが最小の条件を, 粗さ重視の加工条件と定めた.



【図 7-1-3 加工条件と切削抵抗, 表面粗さの関係(2) 2mmD】

0.5mmD 工具の結果を、図 7-1-4 に表す。送り速度を上げると切削抵抗が比例的に増大してしまつたため、送り速度ではなく切込み深さを大きくして能率重視の加工条件とし、左図に青矢印で示した。一方、粗さを重視するときは、浅切込み低送りとし、右図に橙矢印で示した。求めた暫定の適正加工条件を表 7-1-2 に示す。

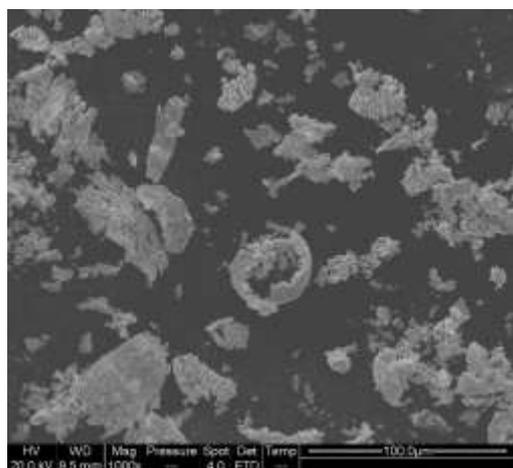


【図 7-1-4 加工条件と切削抵抗，表面粗さの関係(2) 0.5mmD】

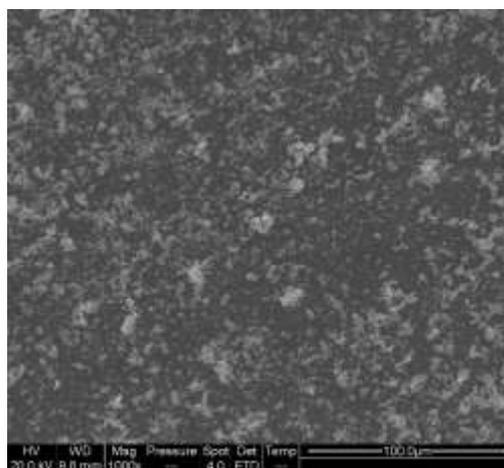
【表 7-1-2 適正加工条件(暫定) クリープフィード】

工具径 D mm	D	2		0.5	
		能率	粗さ	能率	粗さ
優先項目					
主軸回転数 N rev/min		40000		20000	
送り速度 F mm/min		800	10	100	10
切込み深さ Ad mm		0.0100	0.0025	0.0050	0.0025
加工能率 Q mm ³ /min	D・Ad・F	16	0.05	0.25	0.0125

図 7-1-5 に、加工能率重視の加工条件で切削したときの切りくずを示す。2mmD 工具の切りくずの多くは、流れ型または断続型に分類されるが、0.5mmD 工具の切りくずの多くは粉状であることがわかる。



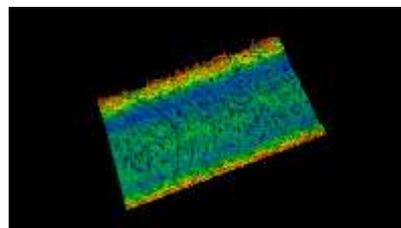
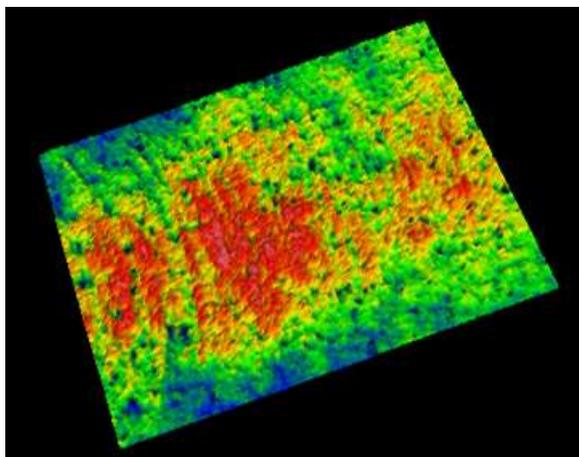
a) 2mmD



b) 0.5mmD

【図 7-1-5 切りくず】

図 7-1-6 には, 粗さ重視の加工条件で仕上げた溝の底面性状を, 走査型白色干渉方式顕微鏡(ZYGO 製 NewView7300)で測定した結果を示す. WC 粒子の脱落が少なく, カッターマークがそろった良好な加工面といえる.



↑ 0.5mmD 工具での加工面
0.011 μ mRa
⇐ 2mmD 工具での加工面
0.006 μ mRa

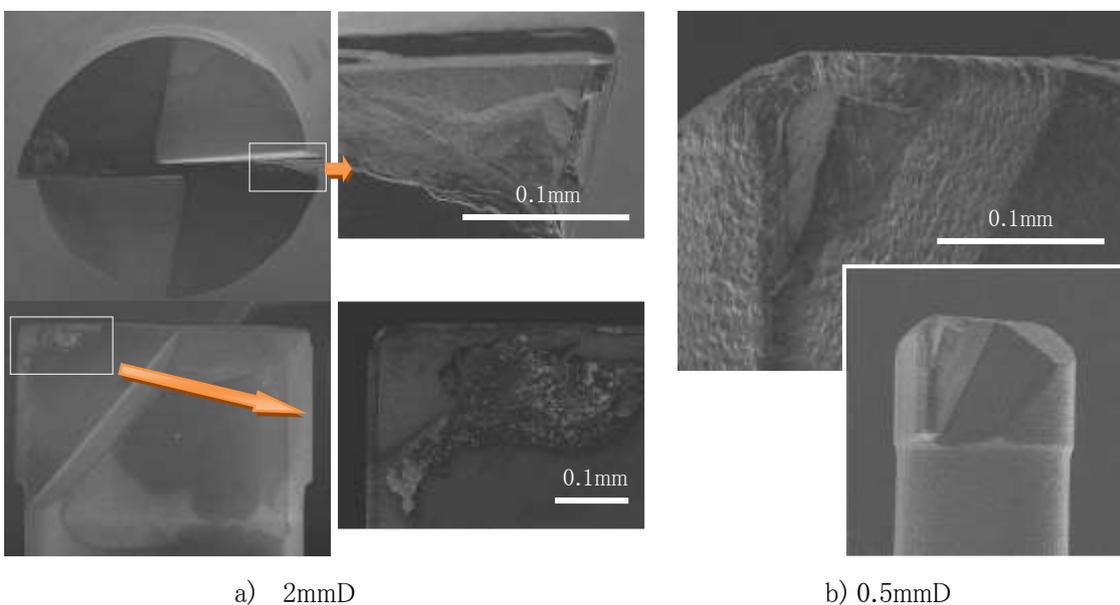
【図 7-1-6 溝底面性状(走査型白色干渉方式顕微鏡)】

7-1-2. 工具寿命

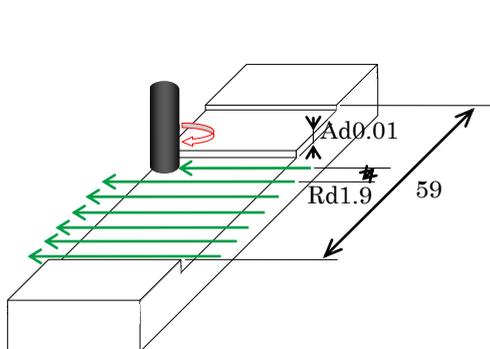
能率重視加工条件でAd0.01mmの切込みを繰り返し、2mmD 工具では幅2×深さ2×長さ20mm、総除去量 80mm³の矩形溝を、0.5mmD 工具では幅0.5×深さ0.5×長さ20mm、総除去量 5mm³の矩形溝を加工し、それぞれの工具損耗の状態を調べた。図 7-1-7 から、すくい面・逃げ面ともに被膜が剥離し、工具寿命に至ったことがわかる。厚み 10~15μm の被膜が割れて欠けているが、摩耗が進んで割れたのか、それとも衝撃等によって割れたのかまでは判別できない。

ほぼ同条件(図 7-1-8)で平面加工したところ、2mmD 工具が同等の総除去量 80mm³で工具寿命に至った。このことから、工具寿命の短さは、深溝加工に特有ではないことがわかった。このときの工具損傷状態を図 7-1-9 に示す。

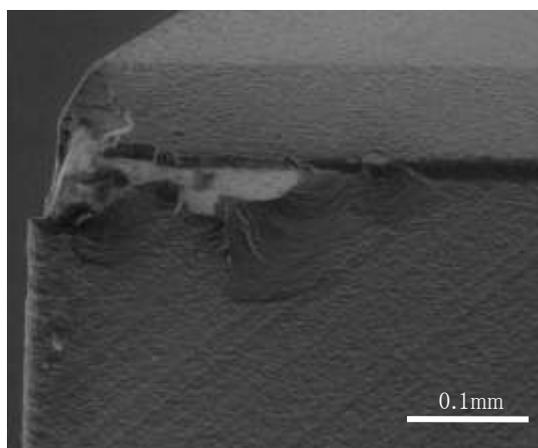
工具の価格を考えると、今回の工具寿命は満足できるものではない。能率重視と粗さ重視のほかに、工具寿命重視の加工条件やツールパスを検討する必要がある。図 7-1-1 では、切込み用の低速送りは不要と考察したが、衝撃回避のために再検討する必要がある。また、電着砥石では不可能な高付加価値加工(高精度、高品位、微細)にのみ、優先的に用いるという考えもある。



【 図 7-1-7 工具損傷（矩形溝加工） 】



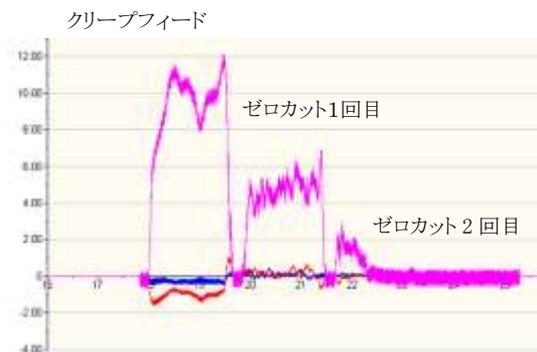
【 図 7-1-8 平面加工 】



【 図 7-1-9 工具損傷（平面加工） 】

7-1-3. 削り残し

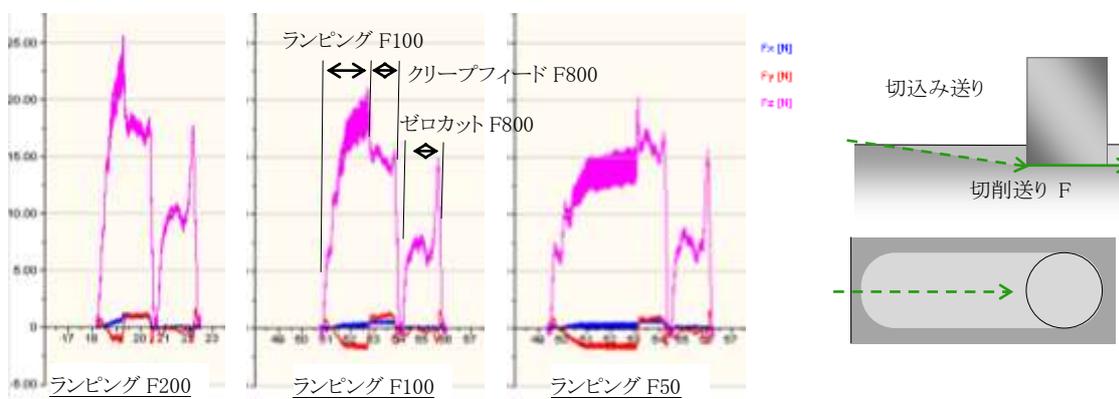
2mmD 工具で能率重視の加工を行ったあと、工具を上下させずに、同じ溝上を2往復させることで、削り残しの有無を調べた。そのときの切削抵抗の変化(図 7-1-10)から、削り残しが存在することがわかる。これは研削加工でのスパークアウトにあたるが、それとは反対に、加工面粗さは悪化した。高い加工精度と粗さを実現するには、削り残しが小さくなる低負荷のツールパス、または高剛性の機械系(工作機械、ツーリング、治具・取付具)等が望まれる。



【 図 7-1-10 ゼロカット時の切削抵抗 】

7-2. 実験1-2 ランピング

ランピングパスで切り込むとき、負荷が大きくなって工具が損傷することが懸念される。そこで、切削抵抗がクリープフィードのときと同じになるまで、送り速度を下げることにした。傾斜角度は 0.1° または 0.2° とした。実験例を図 7-2 に示す。ランピングの送り速度を F50 まで下げると、クリープフィード F800 と切削抵抗が同等になったため、これを 2mmD 工具、傾斜角度 0.2° の適正加工条件とした。表 7-2 に適正加工条件をまとめる。



【 図 7-2 切削抵抗 2mmD 0.2° ランピング 】

【表 7-2 適正加工条件 ランピング】

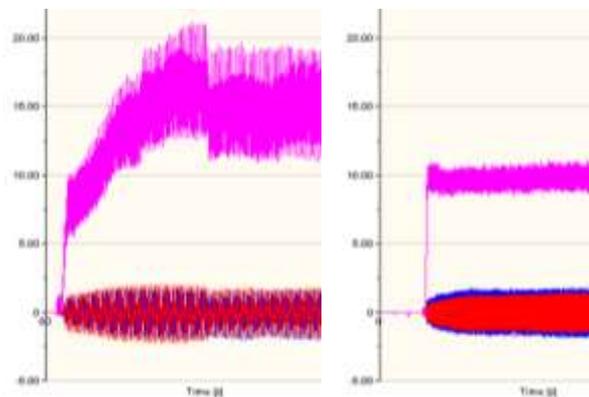
工具径 D mm	2		0.5
傾斜角度 $^\circ$	0.2	0.1	0.1
主軸回転数 N rev/min	40000		20000
切込み送り mm/min	50	400	100
切削送り F mm/min	800		100
切込み深さ Ad mm	0.0100		0.0050
必要な溝長さ mm	2.86	5.73	2.86

7-3. 実験1-3 ヘリカル

ヘリカル加工の傾斜角度を 0.1° とし、切削抵抗がクリープフィードのときと同じになるまで、送り速度を下げることにした。実験手順はランピングパスのときと同様である。得られた適正加工条件を表 7-3 に、そのときの切削抵抗を図 7.3 に示す。

【 表 7-3 適正加工条件 ヘリカル 】

工具径 D mm	2	0.5
傾斜角度 $^\circ$	0.1	0.1
主軸回転数 N rev/min	40000	20000
送り速度 F mm/min	100	100
揺動半径 mm	0.5	0.15
揺動 1 回転当たりの 切込み深さ mm/rev	0.0055	0.0016



(a) 2mmD

(b) 0.5mmD

【 図 7-3 切削抵抗 ヘリカル 】

8. 実験方法及び結果(実験2) — ダイヤコートエンドミル —

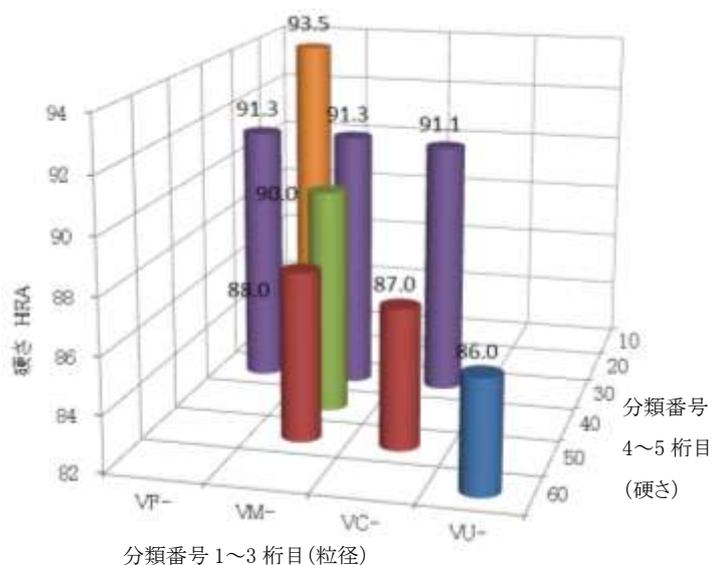
複数の材種の被削性を比較する目的で、ダイヤコート工具を用いて、VM-30 用の適正加工条件(表 7-1-2)でクリープフィード加工を行い、被削性(切削抵抗と工具摩耗)を比較した。

被削材は表 8-1 に示す 8 種類である。各材種の硬さを図 8-1 に、組織(微細構造)を図 8-2 に示す。組織は、自動試料研磨機で研磨した埋込試験片の検査面を、王水で 30 秒間エッチングし、走査型電子顕微鏡を用いて拡大観察して調べた。

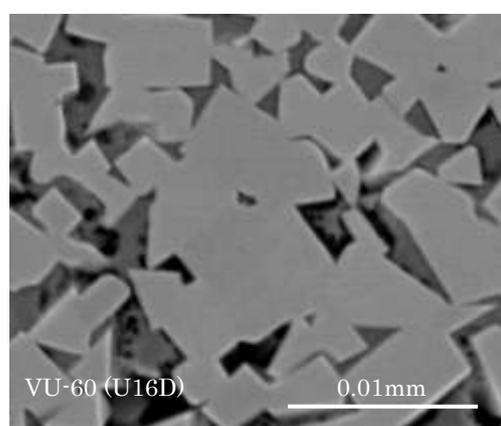
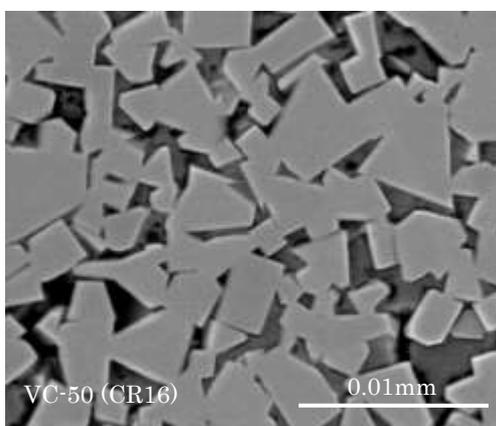
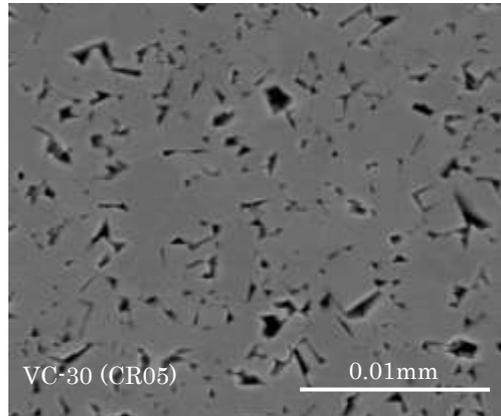
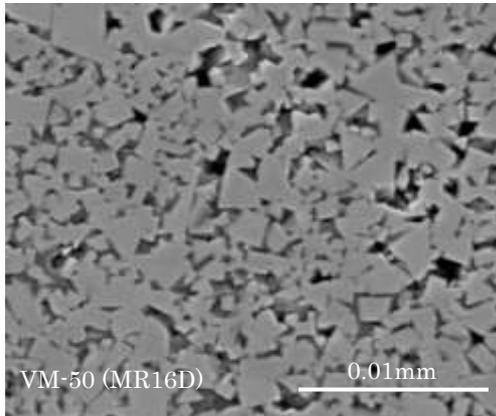
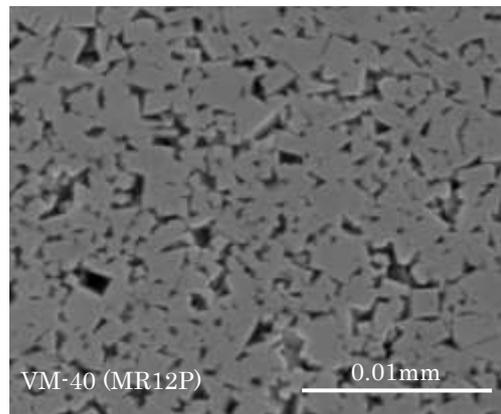
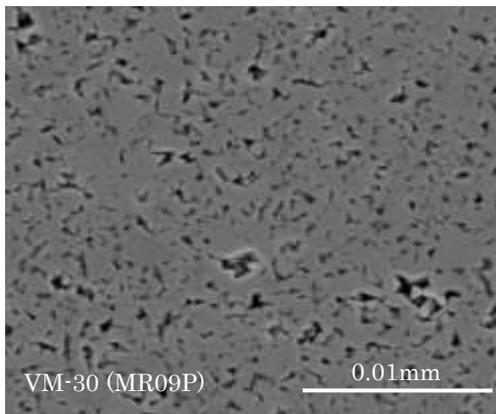
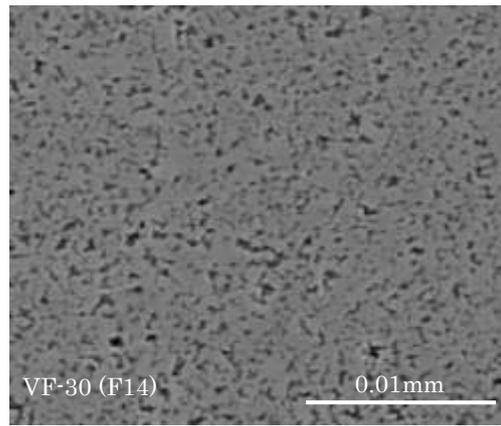
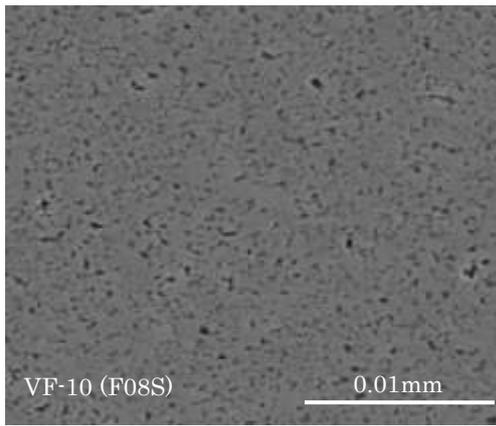
【表 8-1 超硬合金(被削材)の材種と特性】

分類番号 4,5 桁目	分類番号 1~3 桁目	VF- (粒径 0.3~1 μm)	VM- (粒径 1~2.5 μm)	VC- (粒径 3~5 μm)	VU- (粒径 7~10 μm)
10	材種名 抗折力 用途例	F08S 3.7GPa 絞り, 抜き(軽負荷)			
30	材種名 抗折力 用途例	F14 4.7GPa 絞り, 抜き(中負荷)	MR09P 3.9GPa プレス(軽負荷)	CR05 3.2GPa プレス(重負荷) 冷間鍛造(軽負荷)	
40	材種名 抗折力 用途例		MR12P 3.8GPa プレス(軽負荷)		
50	材種名 抗折力 用途例		MR16D 3.8GPa プレス(中負荷)	CR16 3.2GPa プレス(重負荷) 冷間鍛造(軽負荷)	
60	材種名 抗折力 用途例				U16D 2.9GPa 冷間鍛造(重負荷) 熱間鍛造(軽負荷)

材種名と対応する分類番号, WC(炭化タングステン)粒径, 硬さ, 抗折力はメーカーカタログより。
分類番号に対応する用途例は CIS 規格に基づく。



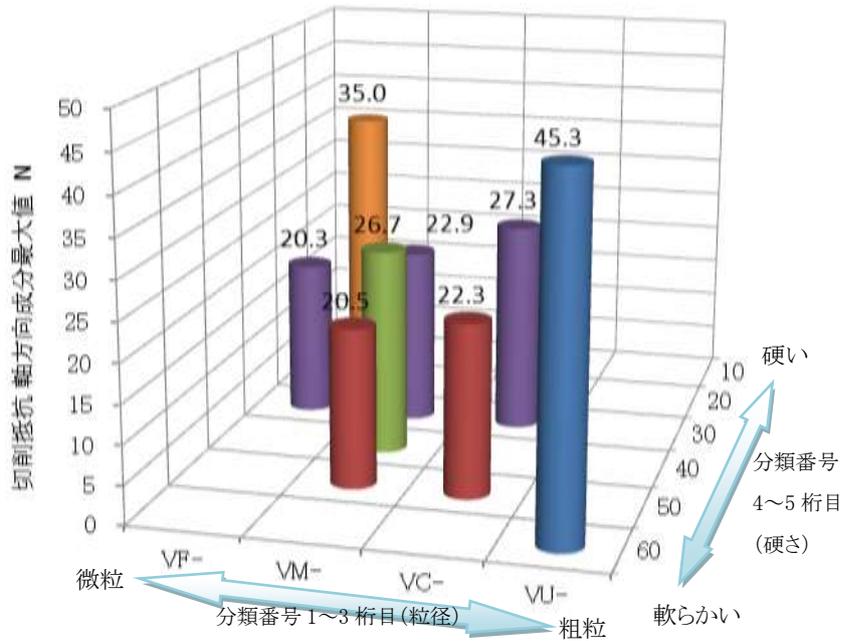
【 図 8-1 超硬合金の材種と硬さ (カタログより) 】



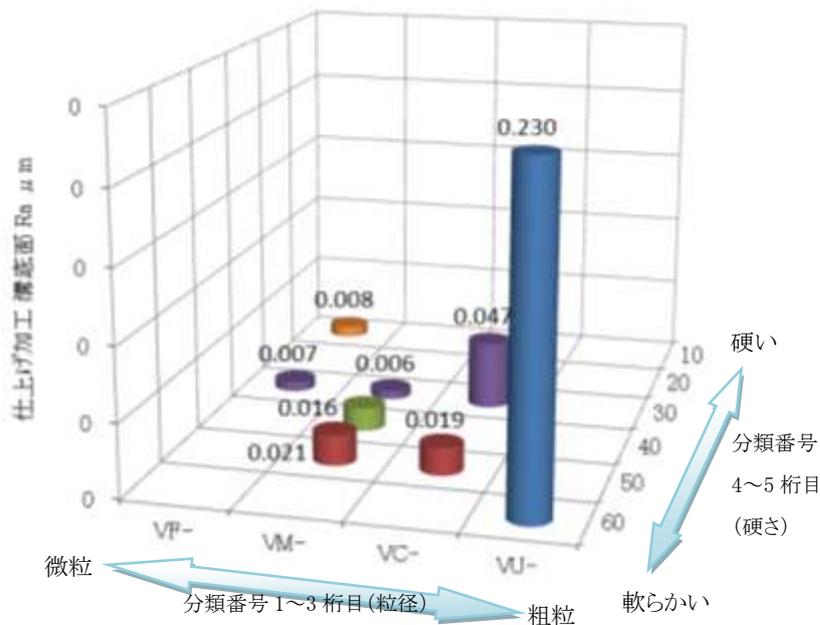
【図 8-2 超硬合金の材種と組織(微細構造)】

図 8-3 に、能率重視条件でクリープフィード加工したときの切削抵抗値を示す。WC 粒子の大きさが同じであれば、HRA 硬さが高いほうが切削抵抗も大きくなる傾向がみられる。また、HRA 硬さが同程度であれば、WC 粒子が大きいほど切削抵抗が大きい。最も切削抵抗が大きかったのは、HRA 硬さが最小で、WC 粒子径が最大の VU-60 であった。

図 8-4 には、能率重視条件で加工したのち、粗さ重視条件で仕上げたときの溝底面粗さを示す。WC 粒子の大きい材種、特に VU-60 は、浅切込み低送り加工を施しても、粗さが向上しないことがわかった。

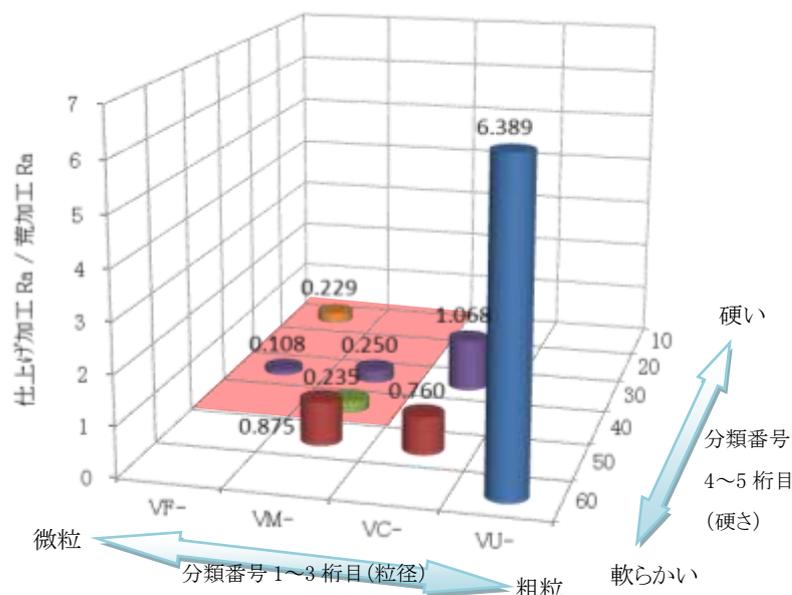


【図 8-3 超合金の材種と切削抵抗】



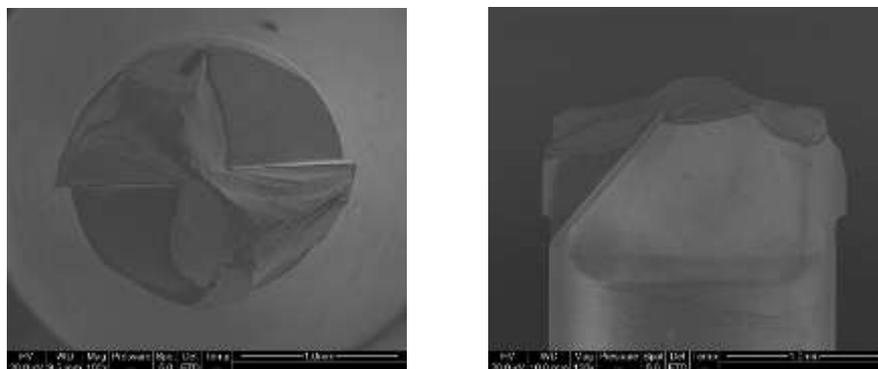
【図 8-4 超合金の材種と溝底面粗さ】

図 8-5 には、粗さ重視条件(仕上げ加工)の加工面粗さを能率重視条件(荒加工)の加工面粗さで除した値をグラフで示す。値が小さいほど、仕上げ加工の効果が大きい。浅切込み低送りによる仕上げ加工が効果的なのは、比較的 WC 粒子が小さく、HRA 硬さが高い材種(3D グラフの床面を着色した材種)であることがわかった。また、それ以外の材種(VC-30, VC-50, VM-50, VU-60)に対しては、VM-30 の適正加工条件が適さないことがわかった。VU-60 では、仕上げ加工によって、かえって面粗さが悪化している。このことには、切込み深さと WC 粒子径の大小が関係していると推測している。



【図 8-5 荒加工面と仕上げ加工面の粗さの比較】

図 8-6 は、切削音が変わるまで切込み深さ 0.010mm の溝加工を続けたあとの 2mmD ダイヤコートエンドミルである。総除去量は 76mm³(幅 2mm×深さ 1.9mm×長さ 20mm)である。工具損耗状態を示す同図と図 7-1-7 と比較すると、工具寿命の面でも、VM-30 より VM-60 のほうが難削性であることがわかる。



【図 8-6 VM-60 を 76mm³加工後の 2mmD ダイヤコートエンドミル】

9. まとめ

【実験1】超硬合金 VM-30 を被削材としたときの軸付電着ダイヤモンドストレート砥石(以下, 電着砥石)とダイヤモンドコーテッドラジアスエンドミル(以下, ダイヤコート工具)の適正ミーリング条件を, ツールパスごとに調べた.

- (1) 電着砥石での深切込み低送り溝加工では, 研削液が研削点まで供給されにくく, 短時間でめっき層の剥離までに至ってしまう. $\phi 4$ 電着砥石#100 では, 軸方向切込み深さ 3mm の溝を加工できなかった.
- (2) 一方, 研削液の供給を改善したトロコイドパスでは, 幅 4mm・深さ 3mm の溝を, $\phi 3$ 電着砥石 #100 で加工することができる. そのときの加工条件は, 側面加工の適正条件から, 研削のフライスモデルを用いて導出することができる.
- (3) ヘリカルパスにステップフィード(イニシャル点復帰)を組み合わせることで, 直径 5.5mm・深さ 3mm の止まり穴を, $\phi 4$ 電着砥石#100 で加工することができる.
- (4) ダイヤコート工具で高能率に溝を加工するには, 浅切込み高送りが有効である. また, 浅切込み低送りによって, 溝底面を鏡面に仕上げることができる. $\phi 2$ 工具では $0.006 \mu\text{mRa}$ が, $\phi 0.011 \mu\text{mRa}$ が得られた. ダイヤコート工具には研削液ではなく, エアブローを使用する.
- (5) 工具のほぼ全幅で切削する溝加工では, すくい面と逃げ面のダイヤコートが割れて剥離し, 工具寿命に至る.
- (6) 工作機械やツーリング, 治具・取付具等の剛性が十分でない場合は, 削り残しが生じる.
- (7) ランピング時の送り速度を下げることで, ダイヤコート工具を損傷させることなく, 傾斜角度 0.1° または 0.2° で切り込みことができる.
- (8) 同様に送り速度を下げることで, ダイヤコート工具を損傷させることなく, ヘリカル加工ができる. このとき, ステップフィードなしでも工具径と同じ深さまで連続加工できる.

【実験 2】VM-30 の適正加工条件のもと, $\phi 2$ ダイヤコート工具で多様な超硬合金材種に溝を加工し, その被削性(切削抵抗, 溝底面粗さ等)を比較した.

- (1) WC 粒子の大きさが同じであれば, HRA 硬さが高いほうが切削抵抗も大きくなる傾向がある. また, HRA 硬さが同程度であれば, WC 粒子が大きいほど切削抵抗が大きい.
- (2) WC 粒子の大きい材種, 特に VU-60 は, 浅切込み低送り加工を施しても, 粗さが向上しない. 浅切込み低送りによる仕上げ加工が効果的なのは, 比較的 WC 粒子が小さく, HRA 硬さが高い材種であり, それ以外の VC-30, VC-50, VM-50, VU-60 等に対しては, VM-30 の適正加工条件は適さない.

10. 文献

- (1) 庄司克雄:研削加工学, 養賢堂, (2004)72-73

チタン・チタン合金の小径ドリル加工

福島県ハイテクプラザ 吉田智
齋藤俊郎
夏井憲司

1. 諸言

チタン・チタン合金は、比重が小さい・比強度が高い・耐食性が高いなどの優れた特性を持つことから、航空・宇宙、輸送、医療をはじめとする様々な分野で用途が拡大してきている。しかし、同時に熱伝導率が低い・ヤング率が小さいといった特性も持っており、これらが工具寿命の低下などを引き起こし、難削材として扱われている。

本研究では、チタン・チタン合金の加工の中で、小型精密部品等の加工で行われる小径ドリル加工を取り上げ、効率的な加工を行うための条件設定について検討を加えた。

2. 調査内容

チタン・チタン合金のドリル加工では、熱伝導率が低いため他の被削材に比べて工具が加工熱による損傷を受けやすいが、直径 1mm 以下の小径ドリル加工では内部給油（センタースルークーラント）が使用できない。さらにドリル径の数倍を超える深穴加工では切り屑詰まりによる折損を生じやすくなるため、加工時にはステップフィードによる刃先冷却・切り屑排出が必要になる。そこで、本研究ではチタン・チタン合金の小径ドリルによる深穴加工の条件設定の指針を得るため、加工効率の面から加工条件について検討を加えた。

実験に使用したドリルはφ0.5mm 超硬合金製ルーマ型ドリル（シャンクφ3mm）5種で、いずれも工具メーカーからオーステナイト系ステンレス（SUS304）加工向けに市販されているものである。表1にそれぞれのドリルの外観・緒元を示す。

加工条件については、各ドリルの推奨条件からチタンと同様に熱伝導率が低く難削材として扱われているオーステナイト系ステンレスの切削条件を参考とし、8割程度の条件である回転数 8,000 回転（切削速度 12.5m/min）、送り速度 32mm/min（回転あたり送り 0.004mm/rev）、ステップフィード量 0.05mm（0.1D）、エマルジョン系水溶性切削液による湿式切削（外部給油）を基準の加工条件として、回転数（切削速度）、送り速度（送り量）、ステップフィード量を表2のように変化させて加工し、加工時間と工具摩耗を比較した。

被削材はチタン合金（Ti-6Al-4V、750℃焼き戻し、100×80×t10mm）で、深さ 4mm（8D）の止まり穴を加工し、100 穴加工ごとの工具摩耗を測定した。加工にあたっては固定サイクル（小径深穴加工ドリルサイクル：G83）を使用している。また、工具食い付き時の振れ周りを防止するため、同径のドリル（スターティングドリル）で深さ 0.3mm の下穴をあけてから加工した。

表 1 ドリル一覧

	先端	側面	緒元
工具 A			ねじれ角 26~32 度 先端角 140 度 超硬合金+コーティング (TiAlN 系)
工具 M			ねじれ角 30 度 先端角 130 度 超微粒超硬合金+コーテ ィング (TiAlN 系)
工具 N			ねじれ角 30 度 先端角 140 度 超硬合金+コーティング (TiCrAlN 系)
工具 O			ねじれ角 30 度 先端角 120 度 超超微粒子超硬合金+コ ーティング (TiAlN 系)
工具 T			ねじれ角 30 度 先端角 140 度 超微粒超硬合金+コーテ ィング (TiCN 系)

表 2 実験条件

No.	回転数 (切削速度)	送り速度 (送り量)	ステップフィード量 (mm)
1	8,000rpm (12.6m/min)	32mm・min (0.004mm/rev)	0.05mm (0.1D)
2	8,000rpm (12.6m/min)	32mm・min (0.004mm/rev)	<u>0.10mm (0.2D)</u>
3	8,000rpm (12.6m/min)	<u>40mm・min (0.005mm/rev)</u>	0.05mm (0.1D)
4	<u>12,000rpm (18.8m/min)</u>	<u>48mm・min (0.004mm/rev)</u>	0.05mm (0.1D)
5	8,000rpm (12.6m/min)	32mm・min (0.004mm/rev)	<u>0.15mm (0.3D)</u>
6	8,000rpm (12.6m/min)	32mm・min (0.004mm/rev)	<u>0.20mm (0.4D)</u>

実験には㈱牧野フライス製作所製 FF 加工機 HYPER5（外観：図 1、機械仕様：表 3）を使用した。また工具摩耗は、走査型レーザー顕微鏡（島津製作所製 OLS1100）を用いて、加工前後のドリル刃先（逃げ面）の観察画像から、刃先の後退量を含む逃げ面摩耗幅を測定した。



図 1 加工機外観

表 3 加工機の仕様

主軸回転数	3,000~32,000rpm
テーブル送り速度	1~16,000mm/min
ストローク	X600×Y400×Z400mm
位置決め精度	±1μm

3. 結果

以下に加工実験の結果を示す。表 4 は各実験条件における一穴あたりの加工に要する時間である（早送り速度 $F0=8,000\text{mm/min}$ の場合）。基準とした No. 1 の条件での加工時間 44.5 秒に対し、ステップフィード量を 2 倍にした No. 2 の条件では 26.0 秒と約 40%の短縮、送り速度を 1.25 倍とした No. 3 の条件では約 10%、回転数を 1.5 倍とした No. 4 の条件では約 18%の短縮となっている。

表 4 穴加工に要する時間

No.	加工時間 (sec)	変更条件
1	44.5	—
2	26.0	ステップフィード量×2
3	40.0	送り速度×1.25
4	36.5	回転数×1.5
5	20	ステップフィード量×3
6	17	ステップフィード量×4

No. 1 の条件における加工時間のうち、切削送りに要する時間は約 23.5 秒（固定サイクル G83 で、R 点 0.2mm、アプローチ距離 0.1mm に設定した際の総移動距離 12.5mm から算出）で、残りの約 21 秒が早送りに要する時間と考えられる。回転数（切削速度）または送り速度（回転あたり送り）を上げた場合、切削送りに要する時間はそれにほぼ反比例して減少するが、ステップフィードの回数は変わらないため、早送りに要する時間は変わらない。上記に基づき、No. 4 の条件で加工した際に要する時間を計算すると、No. 4 では回転数の上昇に伴って送り速度も 1.5 倍になるため、

$$(\text{切削送り時間} : 23.5 / 1.5 = 15.6 \text{ 秒}) + (\text{早送り時間} : 21 \text{ 秒}) = 36.6 \text{ 秒}$$

となり、実測値とほぼ同じ値となる。一方、ステップフィード量を増やした場合は、それに伴ってステップフィード回数が減るとともに切削送りによる移動距離も減少する。回転数を2倍にした際の加工時間(推定)とNo.2の条件の加工時間を比較すると、

$$\begin{aligned} & (\text{切削送り時間} : 23.5/2=11.8 \text{ 秒}) + (\text{早送り時間} : 21 \text{ 秒}) = 32.8 \text{ 秒} \\ & > \text{No.2 ステップフィード量} \times 2 \quad 26.0 \text{ 秒} \end{aligned}$$

となり、ステップフィード量を増やしたほうが加工時間の短縮率が大きくなることがわかる。なお、早送り時間については、No.1の条件での早送りによる移動距離344.6mmから算出される所要時間2.5秒(F0=8,000mm/min時)に対して実際の所要時間は21秒であることから、ほとんどが加減速の時間と考えられ、早送り速度を変えても所要時間はあまり変わらないものと思われる。

以上から、加工効率の面から加工条件を考えた場合、ステップフィード量の調整が効果的であるといえる。

次に工具摩耗であるが、図2はNo.1の条件の加工前後の刃先の観察写真、図3は300

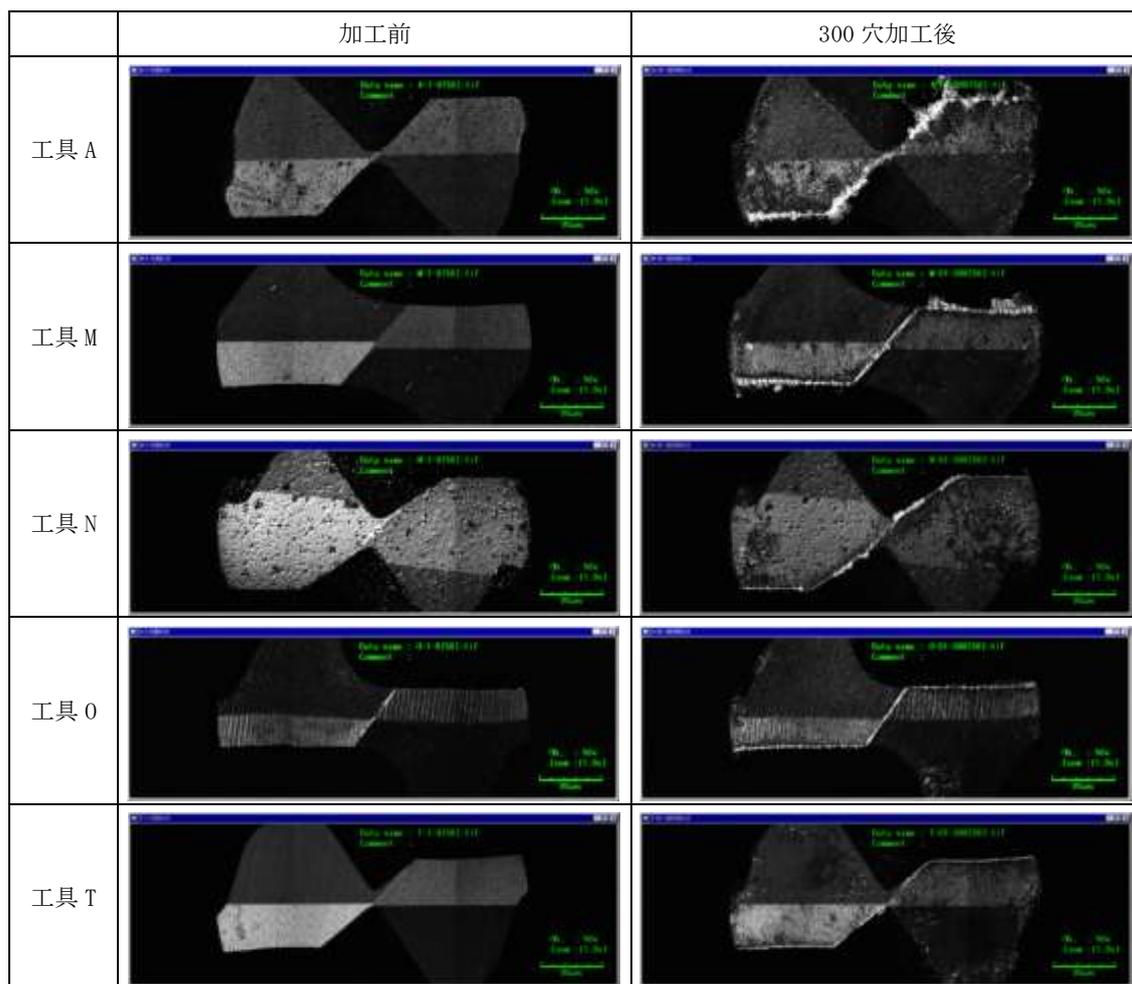


図2 刃先観察写真 (No.1)

穴加工後の工具摩耗の測定値である。工具摩耗は、逃げ面の4~6か所の測定値の平均であり、最大・最小をエラーバーで示してある。この結果を見ると、工具A、M、Nはチップニングなどにより局部的に摩耗が進んでいる個所がみられ、比較的摩耗量も大きい。一方、工具0、Tは摩耗量も比較的小さく、ばらつきも小さい。

図4は実験条件1~4の各工具の逃げ面摩耗を示したものである。工具による摩耗量の傾向としては、いずれの条件でもNo.1の条件と同様、工具0、Tの摩耗が小さくなっている。条件による摩耗量の変化については、工具によりやや傾向が異なり、A、M、TではNo.1の条件が最も摩耗量が大きく、送り速度(送り量)、ステップフィード量を大きくすると摩耗量が小さくなる傾向がみられる。またNでは回転数(切削速度)を上げた条件で摩耗が大きくなっている。

次に図5はステップフィード量を変化させたNo.1、2、5、6の逃げ面摩耗の平均値を示したものである。A、Nはステップフィード量0.15mm(0.3D)で折損(1穴目)、Tはステップフィード量0.2mm(0.4D)で折損(100穴未満)しているが、M、0は特に損傷は見られない。条件による摩耗量の変化については、折損した工具も含めて、ほとんどの工具でステップフィード量を大きくすると摩耗量が小さくなっている。図6は工具MのNo.1、No.2、No.5、No.6の工具摩耗、図7は刃先の観察写真を示したものであるが、ステップフィード量が大きくな

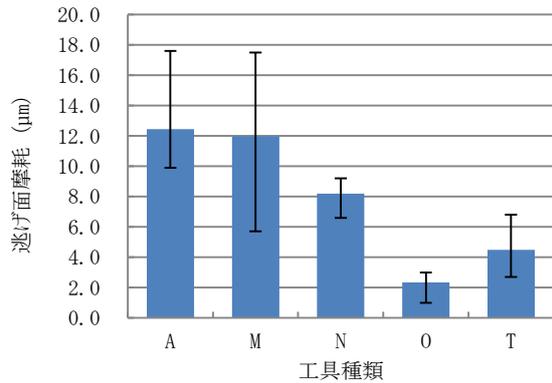


図3 工具摩耗 (No. 1、300 穴加工後)

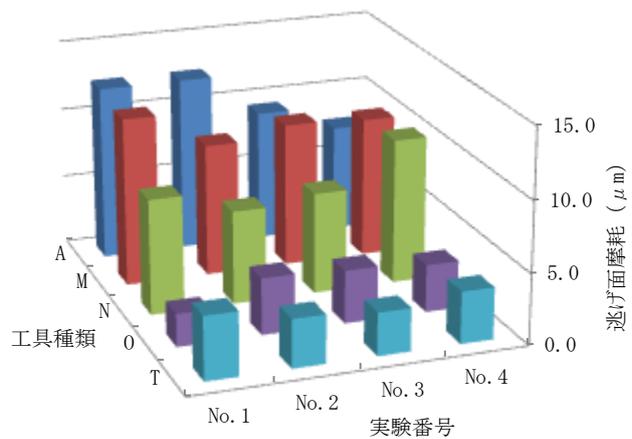


図4 工具摩耗 (No. 1~4、300 穴加工後)

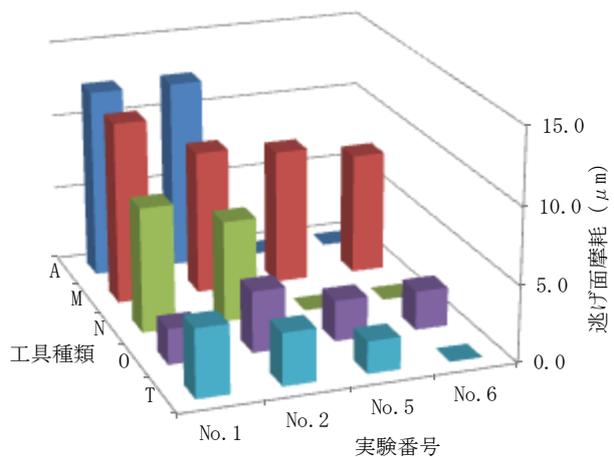


図5 工具摩耗 (No. 1, 2, 5, 6、300 穴加工後)

るにしたがって摩耗量が小さくなっていることが確認できる。

以上の結果について、摩耗量や条件を変化させた際の摩耗量の変化の違いは工具材種やコーティング、切れ刃形状などによるところが大きいと考えられるが、加工条件の変化による影響も認められる。まず送り速度（送り量）については、送り速度（送り量）を上げると、切削時に切れ刃が被削材に接触しながら移動する長さが短くなり、摩耗量が減少する傾向が見られた。また、回転数（切削速度）については、回転数を上げると切削時の刃先の温度上昇が大きくなり、摩耗量が大きくなることが考えられる。ステップフィード量については、ステップフィード量を大きくすると切り屑排出動作の回数が減り、切れ刃に圧着した切り屑の剥離による摩耗（超合金粒子の脱落）が抑えられ、工具摩耗量が小さくなるものと考えられる。

また、ステップフィード量を大きくした No. 5、No. 6 の条件で一部の工具で折損を生じているが、これについては、No. 5 の条件（ステップフィード量 0.15mm (0.3D)）で折損した A、N の工具は、表 1 および図 2 の刃先形状を見ると、他の工具よりも芯厚が厚くなっている。No. 6 の条件（ステップフィード量 0.2mm (0.4D)）で折損した T の工具も、折損していない M、O の工具に比べるとやや芯厚が厚い。今回の加工実験で生じた切り屑の形状を見ると、図 8、図 9（工具 M、No. 1、No. 6 の切り屑の SEM 観察像）のように厚さ数 μm 程度の連続した蛇腹型をしており、No. 6 の条件では長いもので 3~4mm 程度の長さがある。このため、芯厚の厚い工具では切り屑詰まりを生じて折損したものと考えられる。なお、T の工具については、M、O の工具とシンニング形状が異なるために、生成される切り屑形状にも違いがあると思われ、それが切り屑詰まりの一因となった可能性も考えられる。

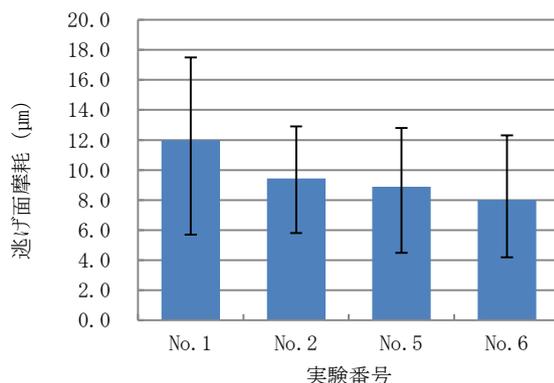


図 6 工具摩耗（工具 M、300 穴加工後）

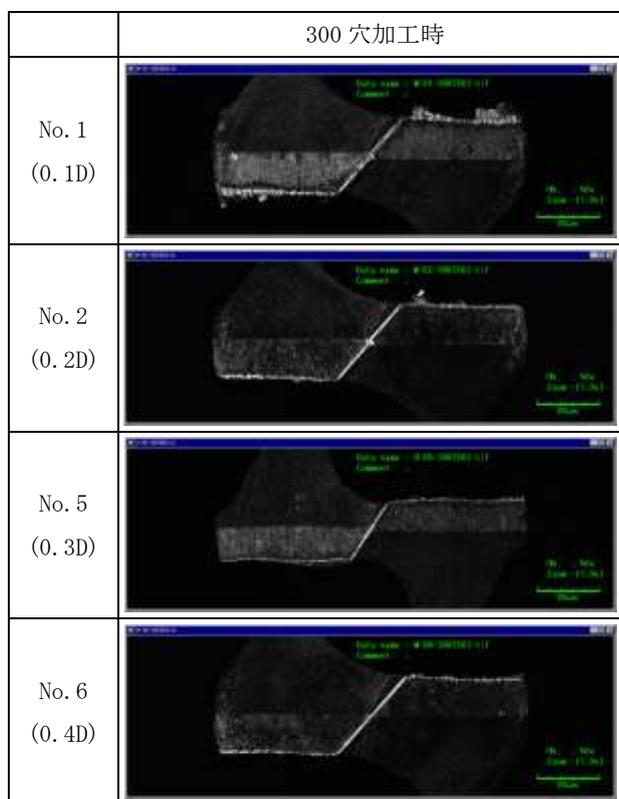


図 7 刃先観察写真（工具 M）



図8 切り屑形状 (工具 M、No. 1)

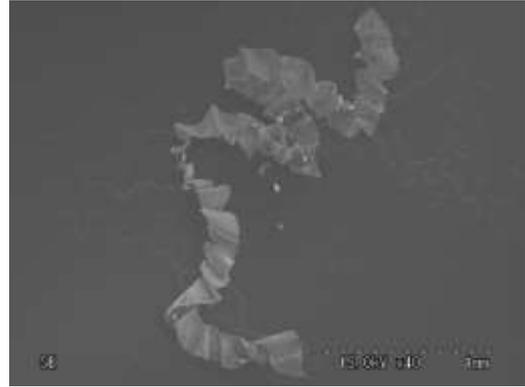


図9 切り屑形状 (工具 M、No. 6)

以上のことから、効率的な穴加工には、工具摩耗の面からもステップフィード量の調整が有効であると考えられるが、工具の形状等により切り屑詰まりによる折損を生じる場合があるので、使用する工具に合わせた条件設定が必要となる。

4. 結言

以上、チタン合金の小径ドリル加工実験を行った結果、次のことが分かった。

- 1) 小径深穴ドリルサイクル (G83) による穴加工では、送り速度 (送り量)、回転数 (切削速度) よりも、ステップフィード量の調整が加工時間短縮に効果的である。
- 2) 送り速度 (送り量) を上げると、切削時に切れ刃が被削材に接触しながら移動する長さが短くなり、摩耗量が減少する傾向が見られる。
- 3) 回転数 (切削速度) を上げると、切削時の刃先の温度上昇が大きくなり、摩耗量が大きくなる。
- 4) ステップフィード量を大きくすると、切り屑排出動作の回数が減り、切れ刃に圧着した切り屑の剥離による摩耗 (超硬合金粒子の脱落) が抑えられ、工具摩耗量が小さくなる。
- 5) チタン合金の穴加工では、蛇腹状の連続した切り屑が生じるため、ステップフィード量を大きくすると、工具形状によっては折損を生じやすくなる。