

「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

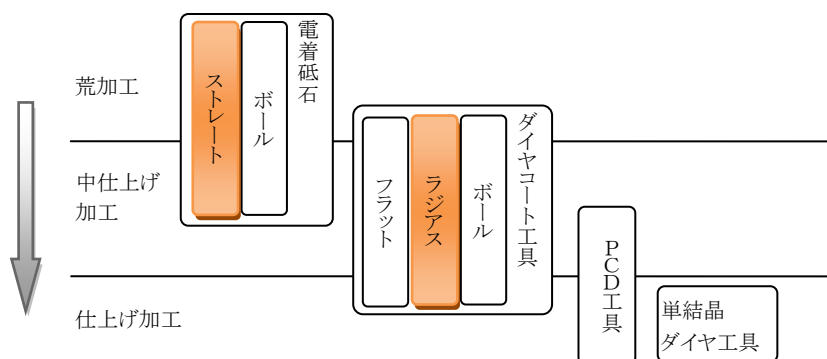
1. 緒 言

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。

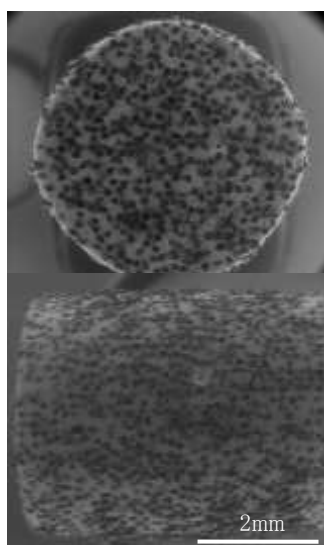
中仕上げ加工には、加工精度が高く、PCD 工具や単結晶ダイヤモンド工具よりも安価とされるダイヤモンド工具が適すると考えられる。ダイヤモンド工具は複数のメーカーから販売されているが、深切込みが可能と公表されているのは、ユニオンツール株式会社製のものだけである(25年1月末現在)。そこで、同社製のダイヤモンドコートラジラスエンドミル UDCLR を選定した。電着砥石での荒加工ののちに中仕上げを行う場合と、電着砥石では加工できない微細形状を直接加工する場合とを想定し、その工具径をそれぞれ 2mm, 0.5mm とした。工具の仕様を表 3-1 に、SEM 写真を図 3-1 に示す。

【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

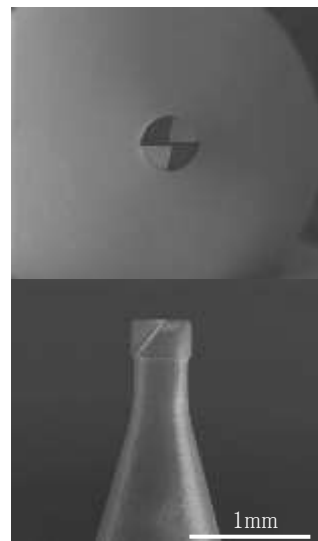
※10 本単位の見積金額の例(平成 25 年 1 月現在)。諸条件によって異なるため、あくまで目安。



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

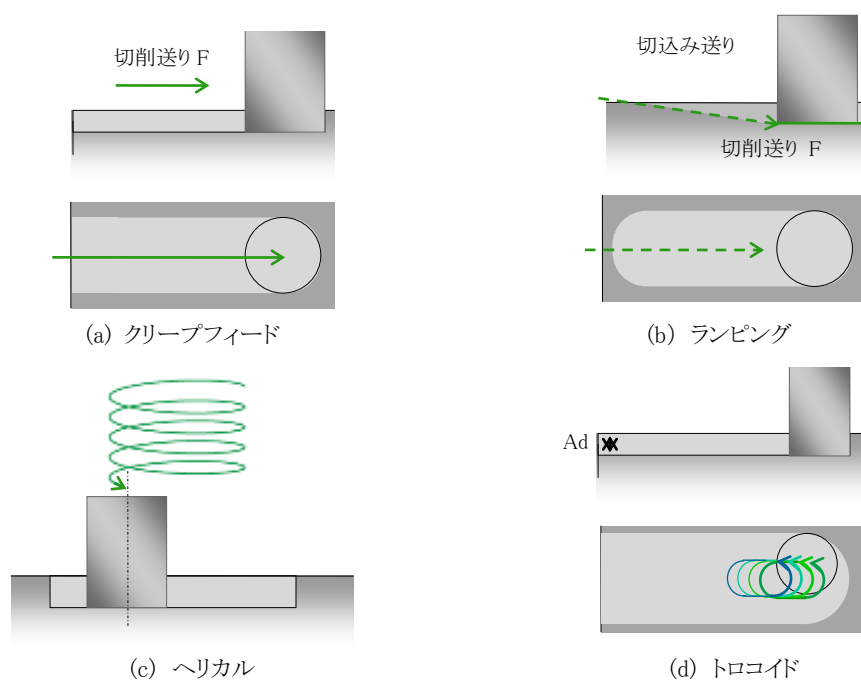
【図 3-1 供試工具】

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】

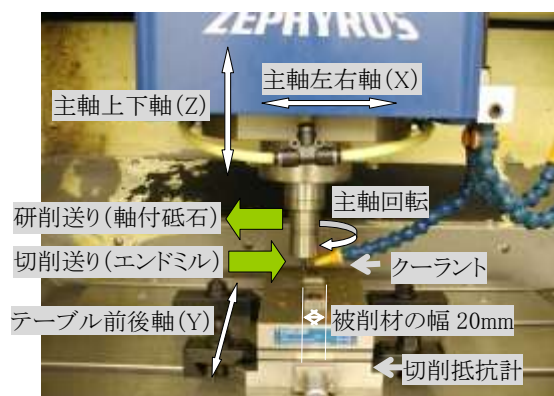
【表 4-1 工具と実験項目の組み合わせ】

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	○	○	○	—	—

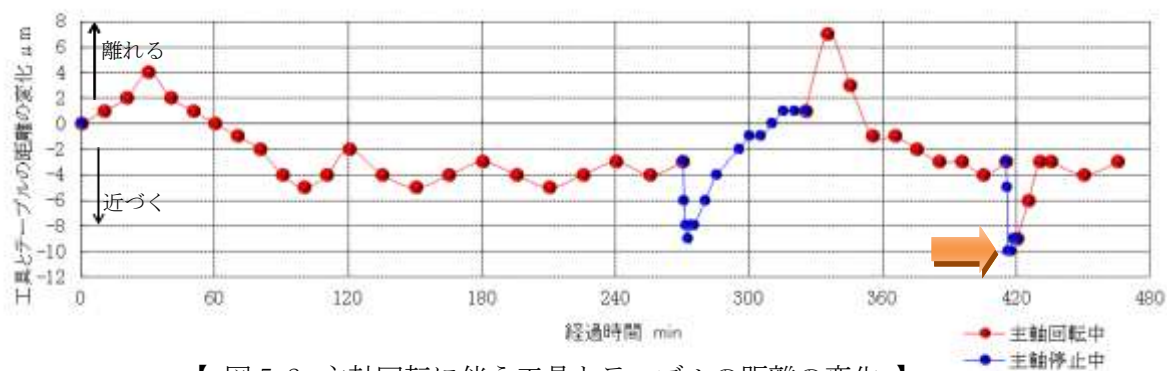
5. 加工機

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経時変化を図 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】

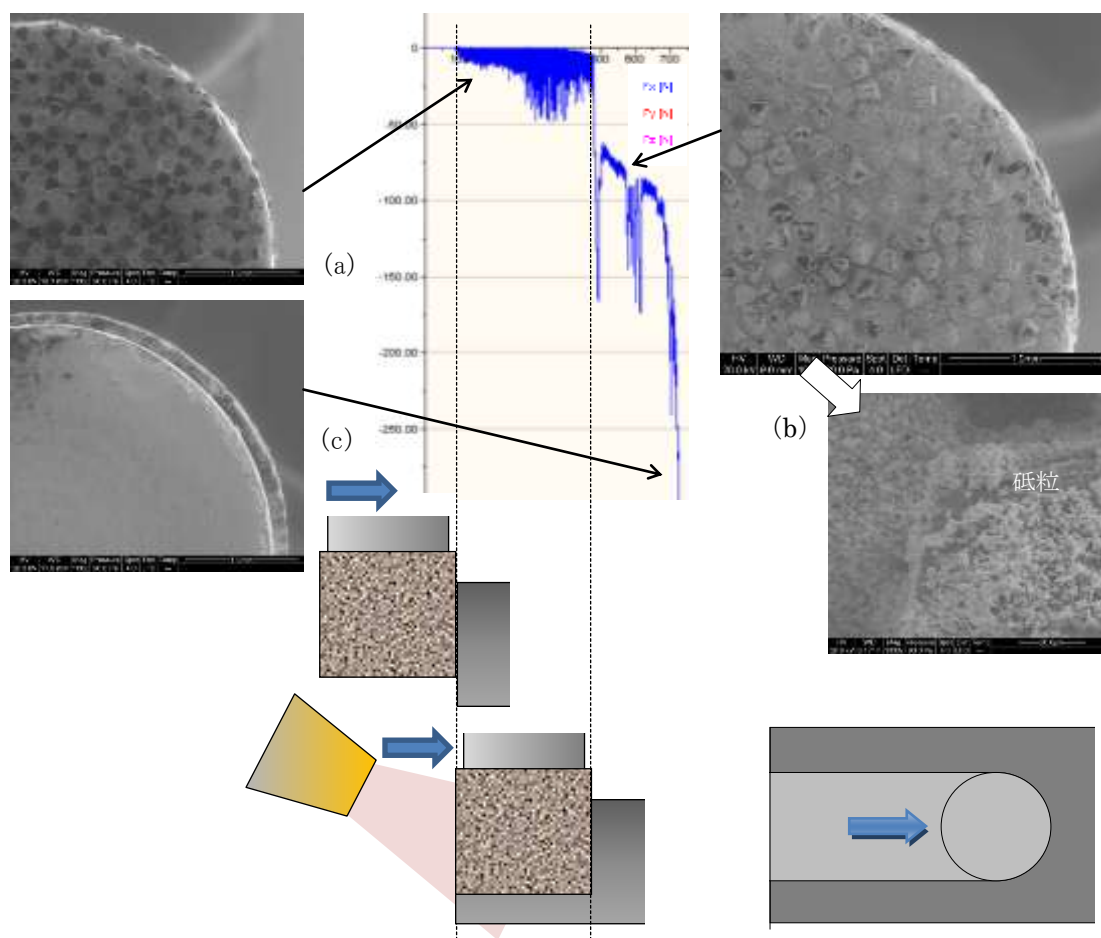


【図 5-2 主軸回転に伴う工具とテーブルの距離の変化】

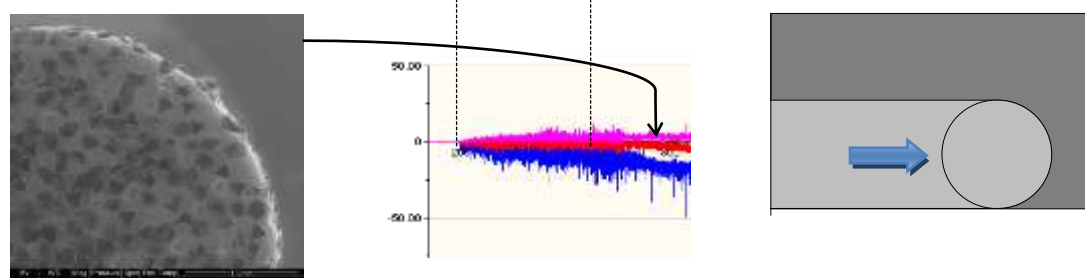
6. 実験方法及び結果(実験1) — 軸付電着砥石 —

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。

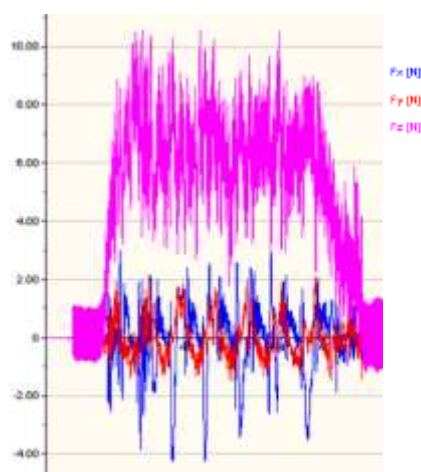
加工後の砥石作業面(図 6-2-2)を見ると、外側ほど砥粒が摩滅するが、内側は外側ほど研削に作用しないことがわかる。このことから、ヘリカルパスの場合、中心部に砥粒は不要と考えられる。

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。

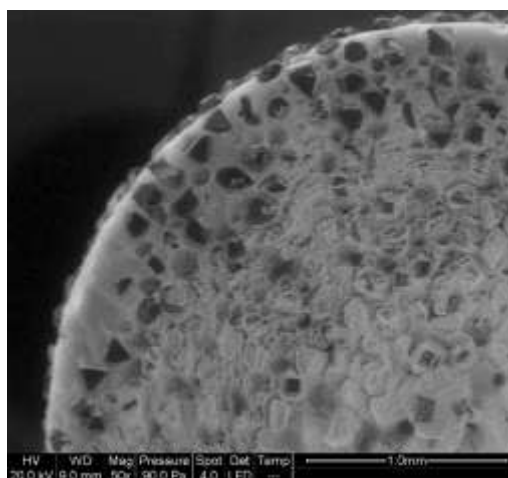
なお、適正条件加工条件は、表 6-2 の加工条件のうち、主軸回転数と送り速度を図 6-2-4 のように変化させ、得られた研削抵抗値をもとに、加工能率も考慮して定めた。

【表 6-2 ヘリカル加工条件】

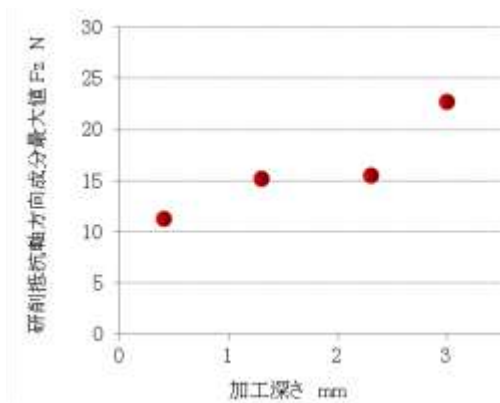
工具径 D mm	4
主軸回転数 N rev/min	60000
送り速度 F mm/min	200(ダウンカット)
揺動半径 mm	0.75
ステップ幅 mm	0.05
揺動 1 回転あたりの切込み深さ mm	0.0075
クーラント	ソリューション



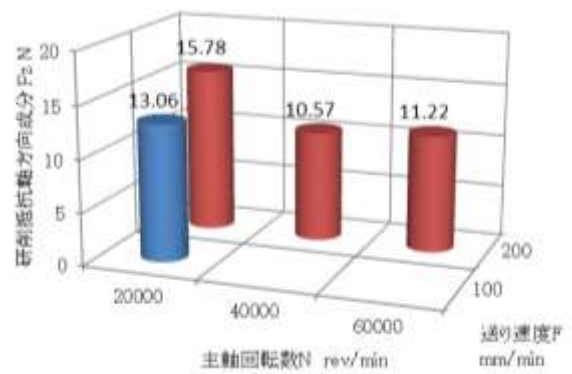
【図 6-2-1 ヘリカル 研削抵抗】



【図 6-2-2 ヘリカル 工具損傷】



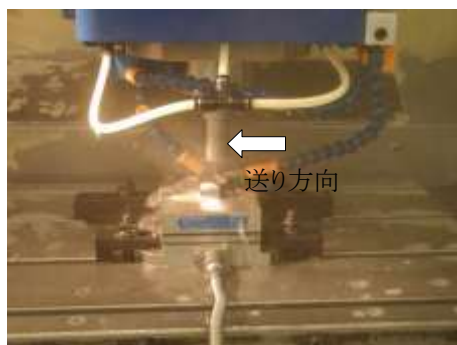
【 図 6-2-3 ヘリカル 研削抵抗の変化 】



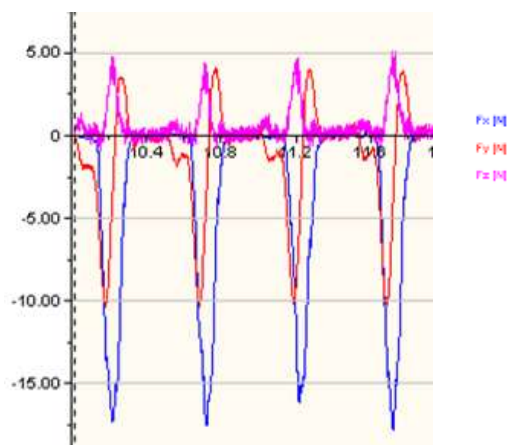
【 図 6-2-4 加工条件と研削抵抗 】

6-3. 実験1-4 トロコイド

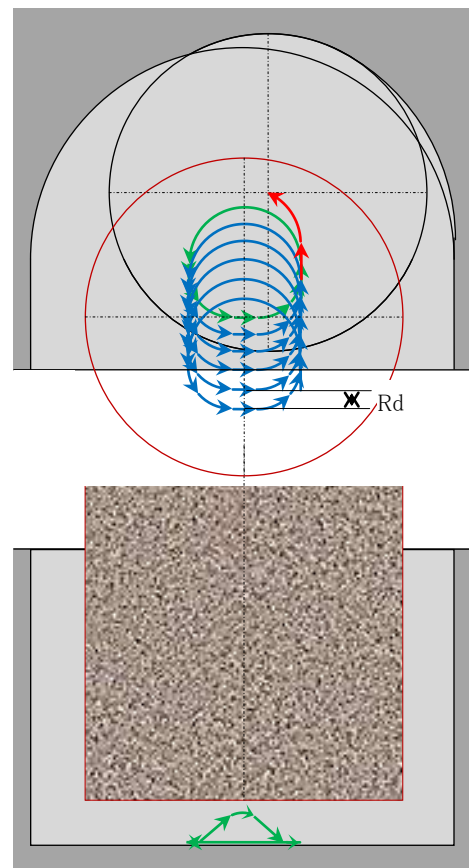
クリープフィードパスでは加工できなかった幅 4×深さ3mm の溝を、トロコイドパスにより、3mmD の#100 電着砥石 1 本で 15mm (総除去量 199mm³) 加工することができた。研削液は、図 6-3-1 のように前後から供給した。そのときの研削抵抗を図 6-3-2 に示す。3成分中では、溝加工方向の成分 (F_x) が最大となっている。図 6-3-3 にはトロコイドパスを示す。切りくず排出性と冷却性を高める目的で、非切削時(後退時)には工具と被削材を離すようにした。



【 図 6-3-1 トロコイド 研削液の供給 】

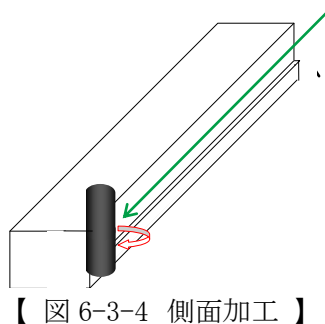


【 図 6-3-2 トロコイド 研削抵抗 】



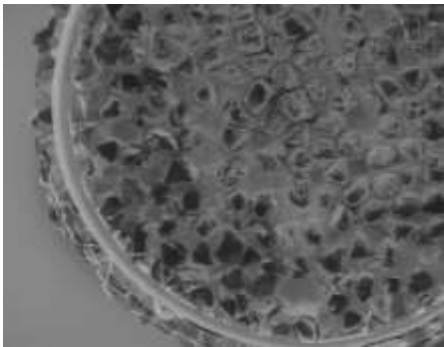
【 図 6-3-3 トロコイドパス 】

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。

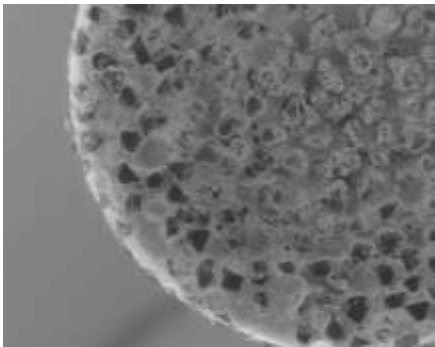


【表 6-2 ヘリカル加工条件】

	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

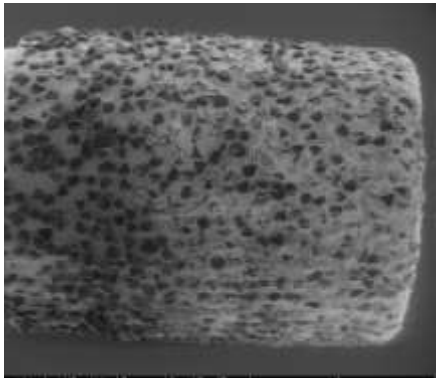
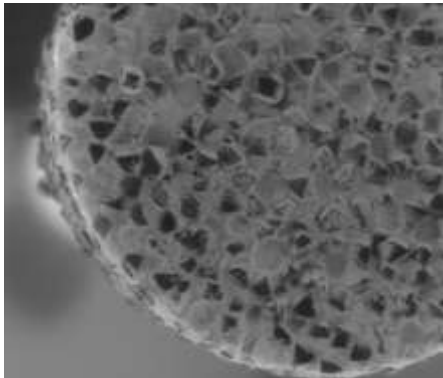


(a) トロコイド(1) 条件 16mm(70mm²)



(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 —

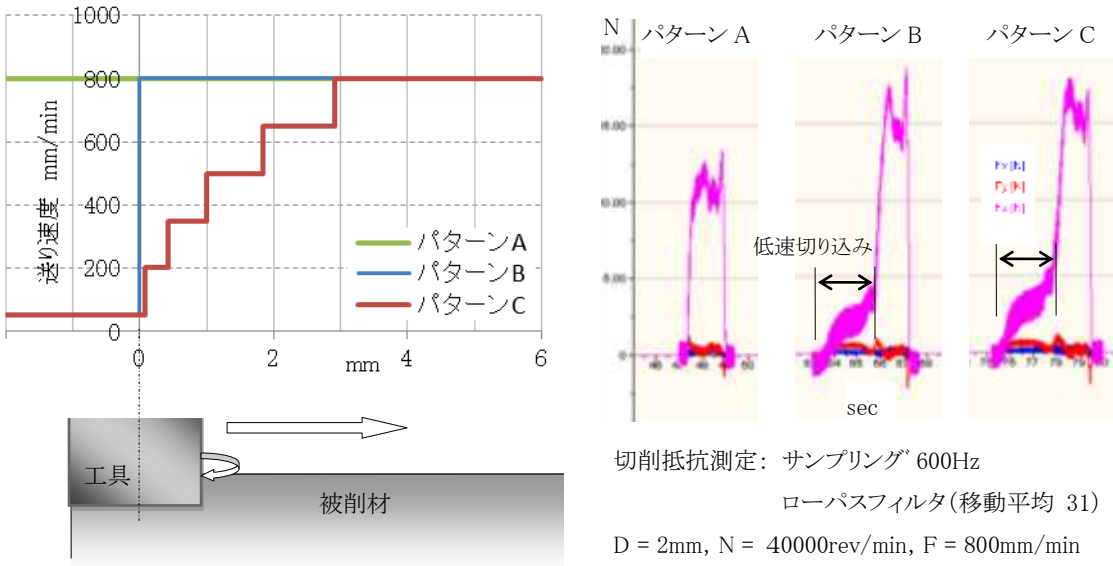
7-1. 実験1-1 クリープフィード

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、切削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。

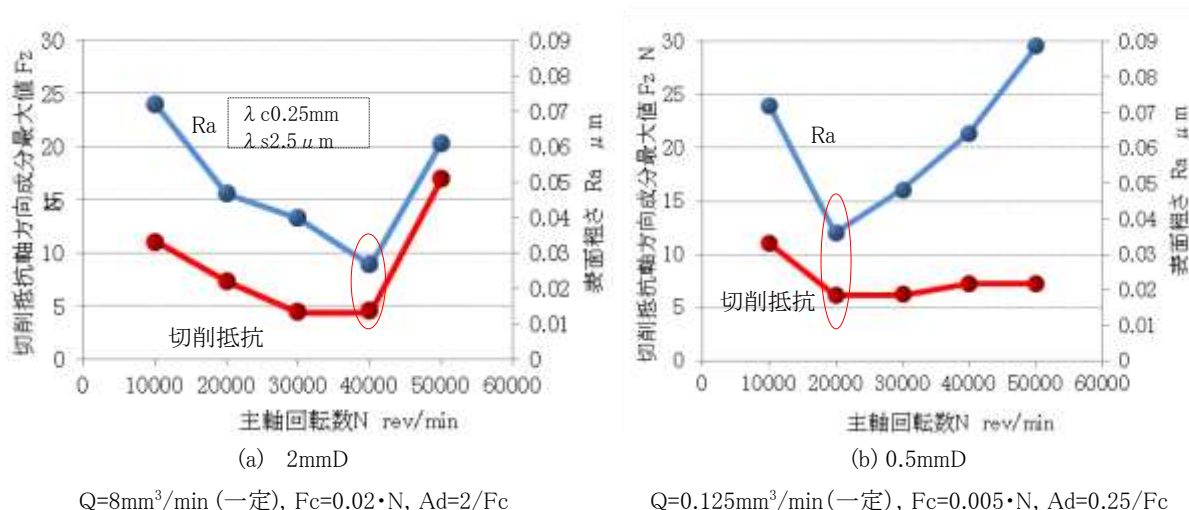


【図 7-1-1 加速パターン(左)と切削抵抗(右)の関係 (F=800)】

【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									

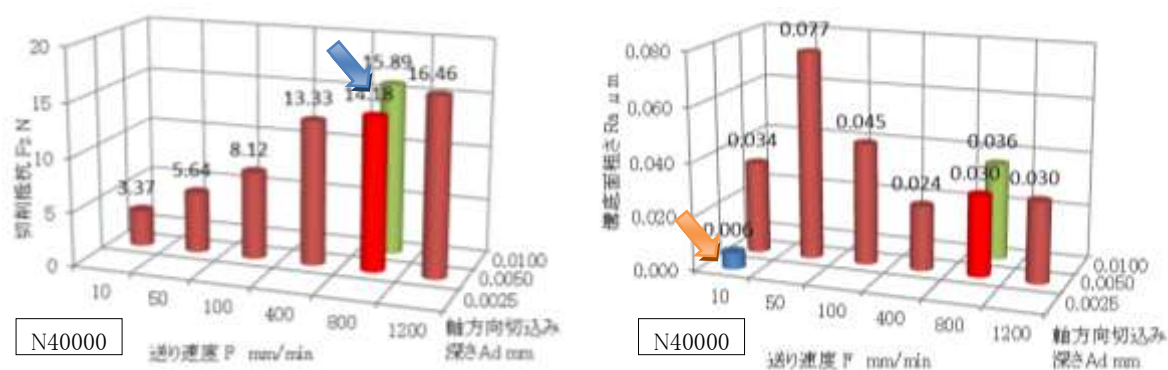
得られた主軸回転数と切削抵抗、表面粗さの関係を図 7-1-2 に示す。2mmD 工具では N40000・Fc800・Ad0.005 の組み合わせのときに、0.5mmD 工具では N20000・Fc100・Ad0.0025 の組み合わせのときに、切削抵抗・溝底面粗さともに最小となった。



【図 7-1-2 加工条件と切削抵抗、表面粗さの関係(1)】

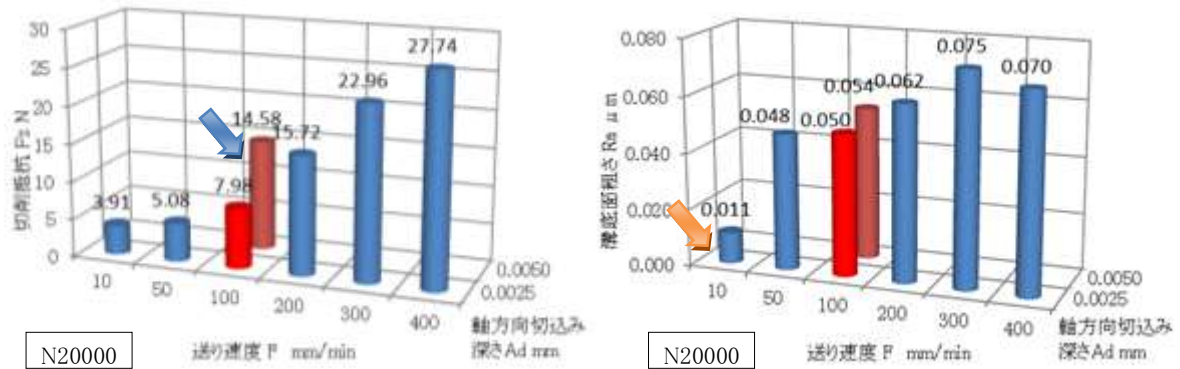
さらに、その加工条件(図 7-1-3, 4 中の赤棒)をもとに、送り速度 F と切込み深さ Ad を変化させ、そのときの切削抵抗と溝底面粗さを調べた。

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いうため、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。

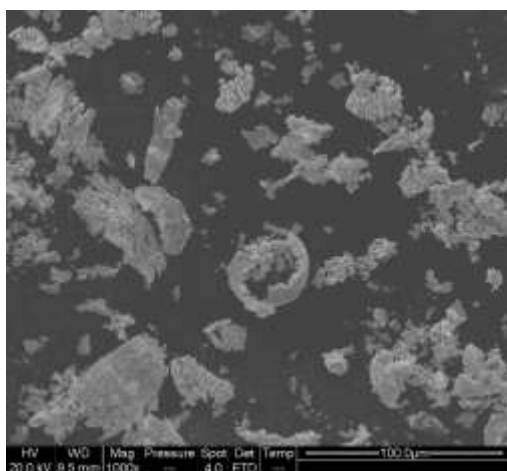


【図 7-1-4 加工条件と切削抵抗，表面粗さの関係 (2) 0.5mmD】

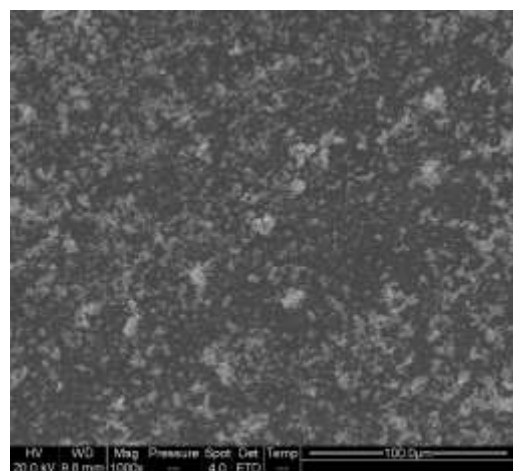
【表 7-1-2 適正加工条件(暫定) クリープフィード】

工具径 D mm	D	2		0.5	
優先項目		能率	粗さ	能率	粗さ
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。



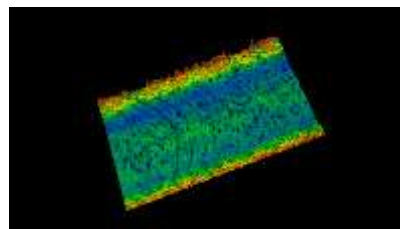
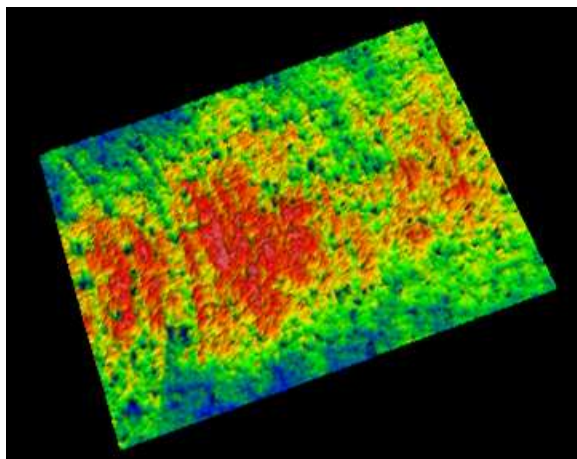
a) 2mmD



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

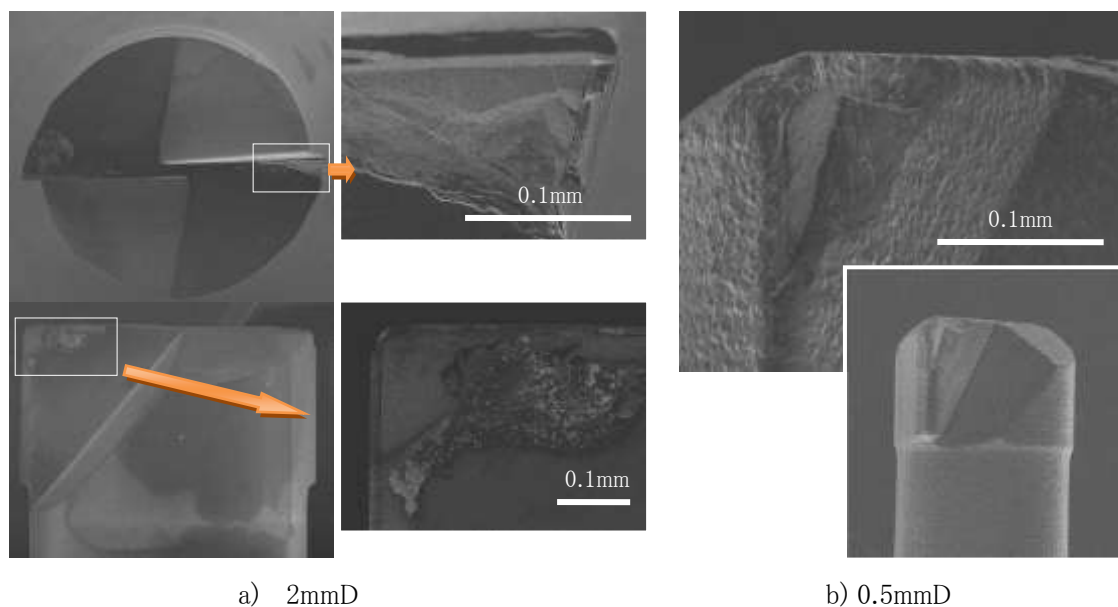
【図 7-1-6 溝底面性状(走査型白色干渉方式顕微鏡)】

7-1-2. 工具寿命

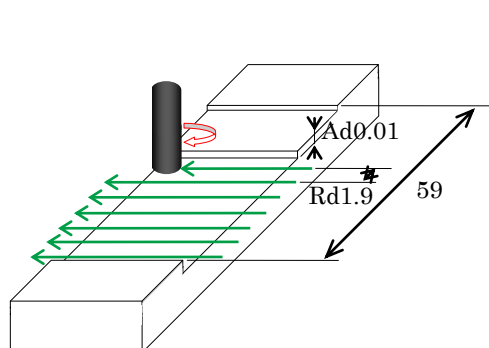
能率重視加工条件で $Ad0.01\text{mm}$ の切込みを繰り返し, 2mmD 工具では幅 $2\times$ 深さ $2\times$ 長さ 20mm , 総除去量 80mm^3 の矩形溝を, 0.5mmD 工具では幅 $0.5\times$ 深さ $0.5\times$ 長さ 20mm , 総除去量 5mm^3 の矩形溝を加工し, それぞれの工具損耗の状態を調べた. 図 7-1-7 から, すくい面・逃げ面ともに被膜が剥離し, 工具寿命に至ったことがわかる. 厚み $10\sim 15\mu\text{m}$ の被膜が割れて欠けているが, 摩耗が進んで割れたのか, それとも衝撃等に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 80mm^3 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.

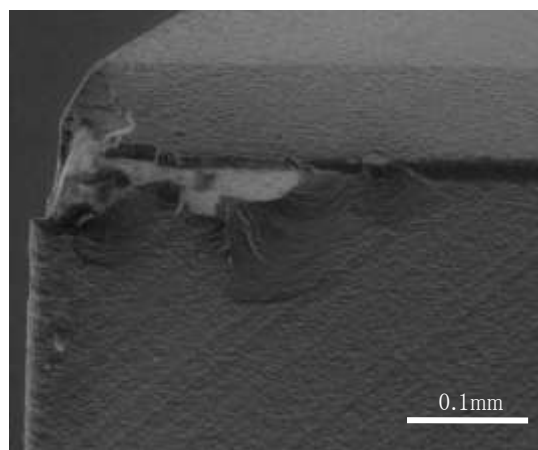
工具の価格を考えると, 今回の工具寿命は満足できるものではない. 能率重視と粗さ重視のほかに, 工具寿命重視の加工条件やツールパスを検討する必要がある. 図 7-1-1 では, 切込み用の低速送りは不要と考察したが, 衝撃回避のために再検討する必要がある. また, 電着砥石では不可能な高付加価値加工(高精度, 高品位, 微細)にのみ, 優先的に用いるという考え方もある.



【 図 7-1-7 工具損傷 (矩形溝加工) 】



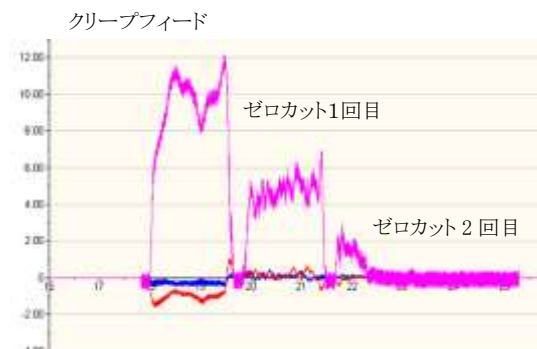
【 図 7-1-8 平面加工 】



【 図 7-1-9 工具損傷 (平面加工) 】

7-1-3. 削り残し

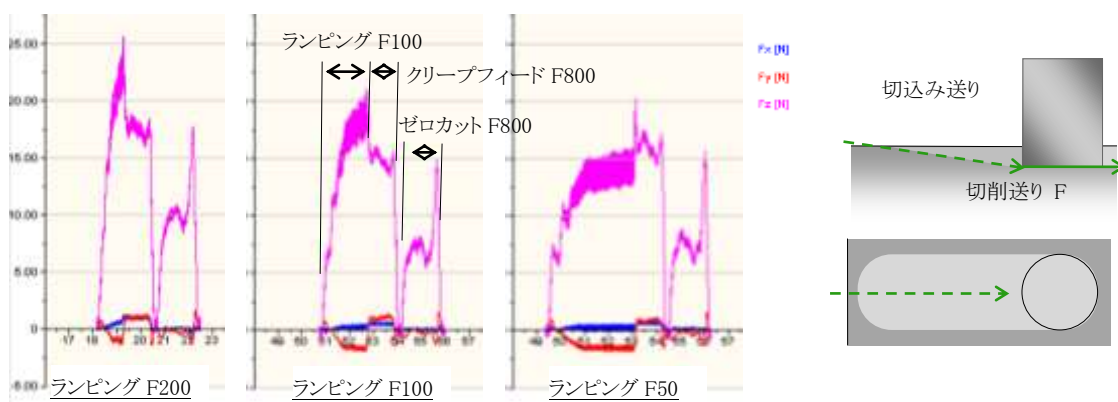
2mmD 工具で能率重視の加工を行ったあと、工具を上下させずに、同じ溝上を2往復させることで、削り残しの有無を調べた。そのときの切削抵抗の変化(図 7-1-10)から、削り残しが存在することがわかる。これは研削加工でのスパークアウトにあたるが、それとは反対に、加工面粗さは悪化した。高い加工精度と粗さを実現するには、削り残しが小さくなる低負荷のツールパス、または高剛性の機械系(工作機械、ツーリング、治具・取付具)等が望まれる。



【 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】

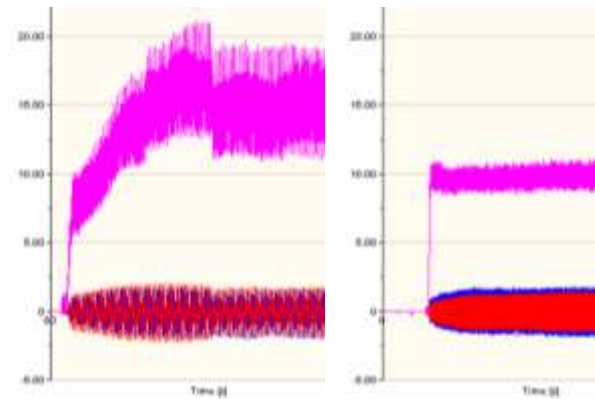
工具径 D mm	2		0.5
傾斜角度 $^\circ$	0.2	0.1	0.1
主軸回転数 N rev/min	40000		20000
切込み送り mm/min	50	400	100
切削送り F mm/min	800		100
切込み深さ Ad mm	0.0100		0.0050
必要な溝長さ mm	2.86	5.73	2.86

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。

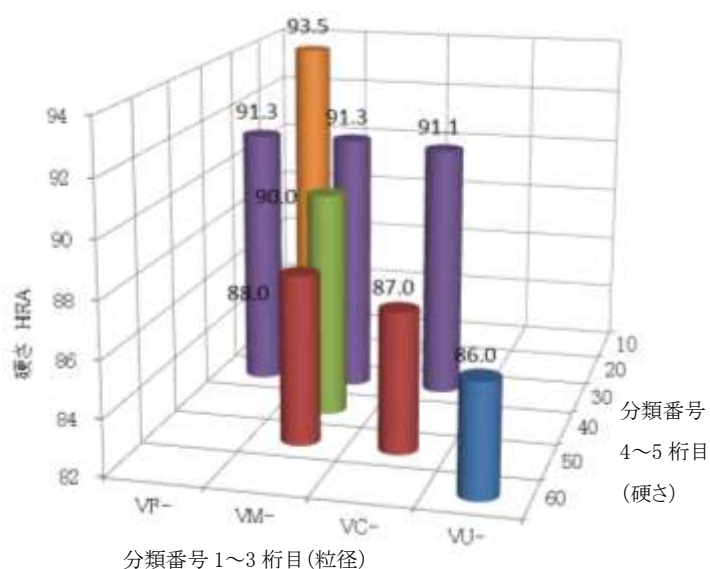
被削材は表 8-1 に示す 8 種類である。各材種の硬さを図 8-1 に、組織(微細構造)を図 8-2 に示す。組織は、自動試料研磨機で研磨した埋込試験片の検査面を、王水で 30 秒間エッチングし、走査型電子顕微鏡を用いて拡大観察して調べた。

【表 8-1 超硬合金(被削材)の材種と特性】

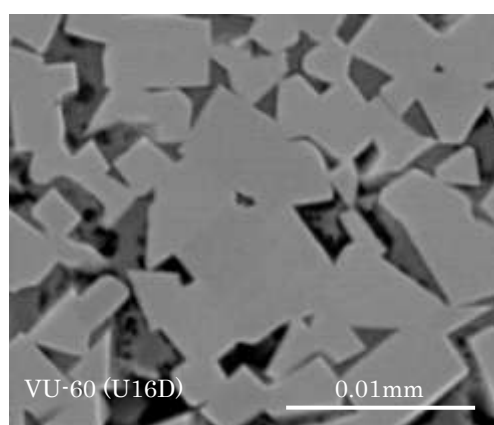
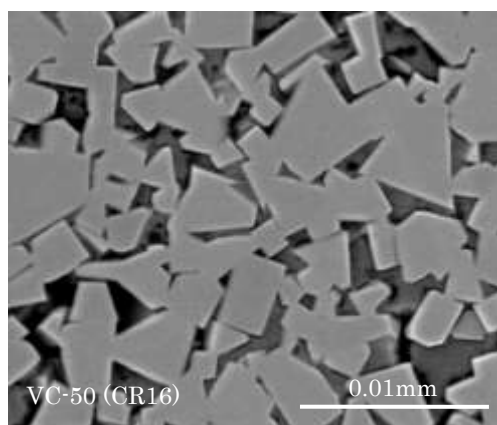
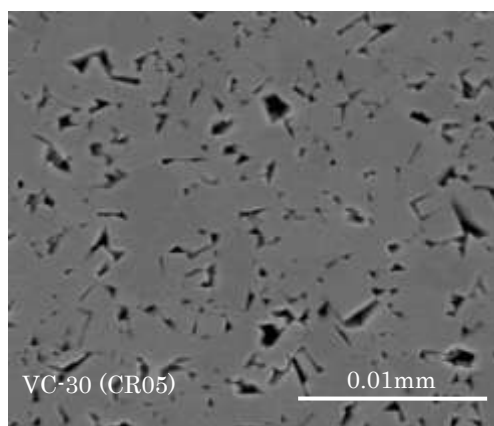
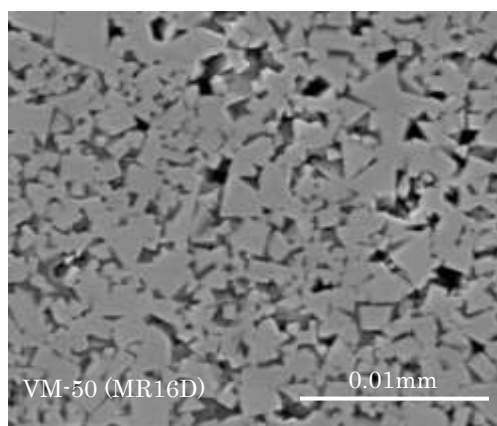
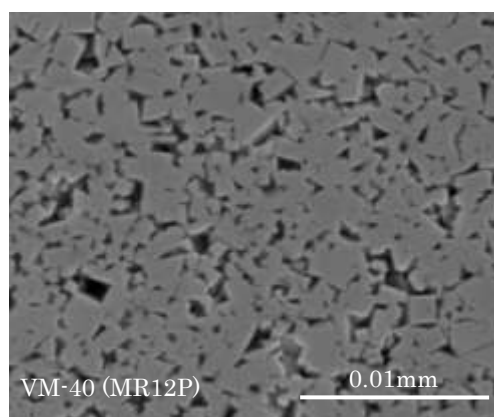
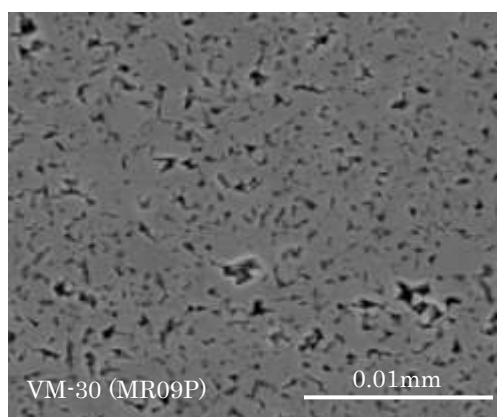
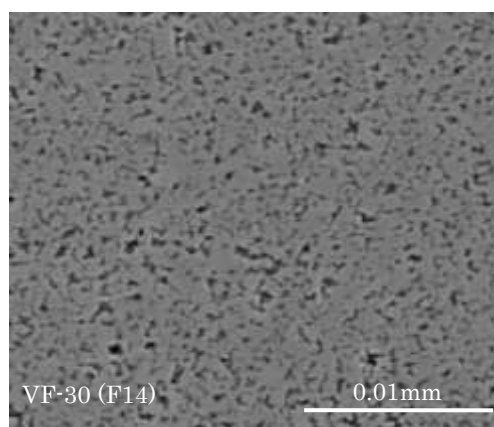
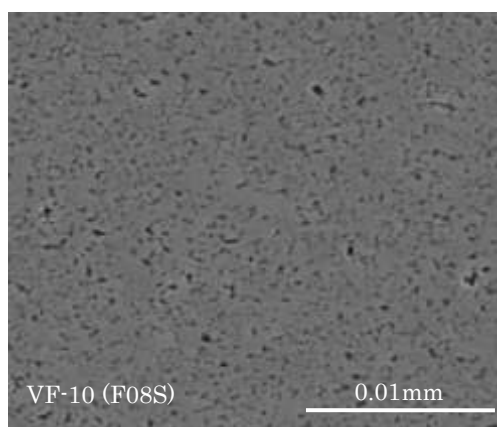
4,5 桁目	分類番号 1~3 桁目	VF- (粒径 0.3~1 μ m)	VM- (粒径 1~2.5 μ m)	VC- (粒径 3~5 μ m)	VU- (粒径 7~10 μ m)
10	材種名 抗折力 用途例	F08S 3.7GPa 絞り, 抜き(軽負荷)			
30	材種名 抗折力 用途例	F14 4.7GPa 絞り, 抜き(中負荷)	MR09P 3.9GPa プレス(軽負荷)	CR05 3.2GPa プレス(重負荷) 冷間鍛造(軽負荷)	
40	材種名 抗折力 用途例		MR12P 3.8GPa プレス(軽負荷)		
50	材種名 抗折力 用途例		MR16D 3.8GPa プレス(中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



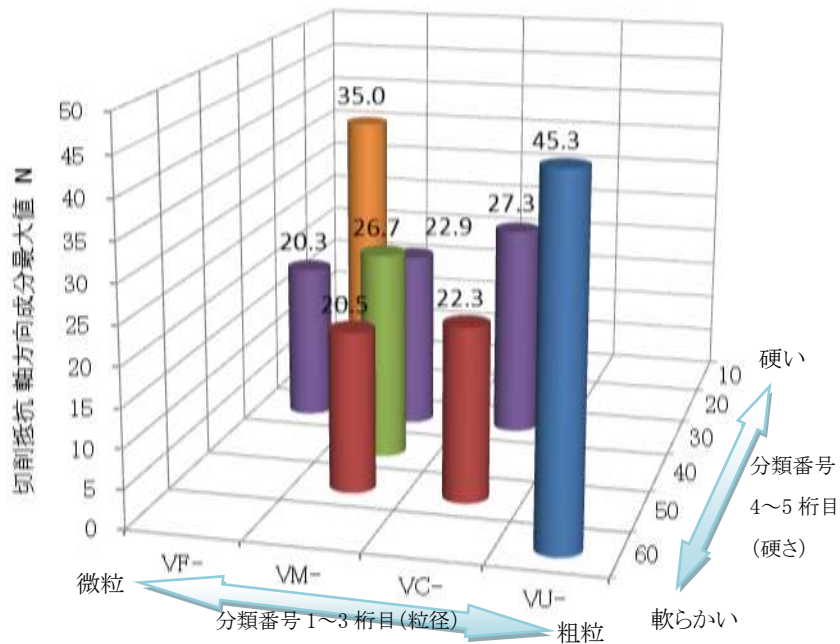
【 図 8-1 超硬合金の材種と硬さ (カタログより) 】



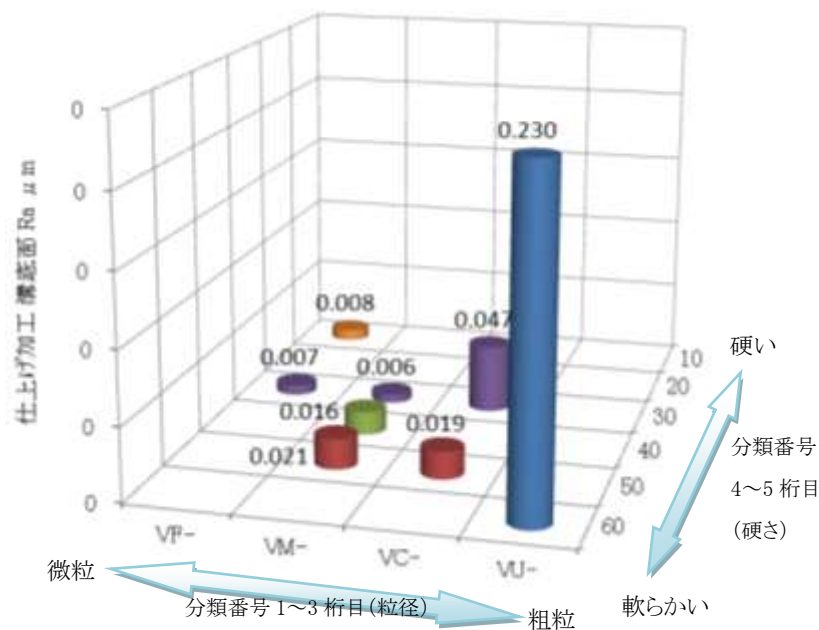
【図 8-2 超硬合金の材種と組織(微細構造)】

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 粒子が大きいく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。

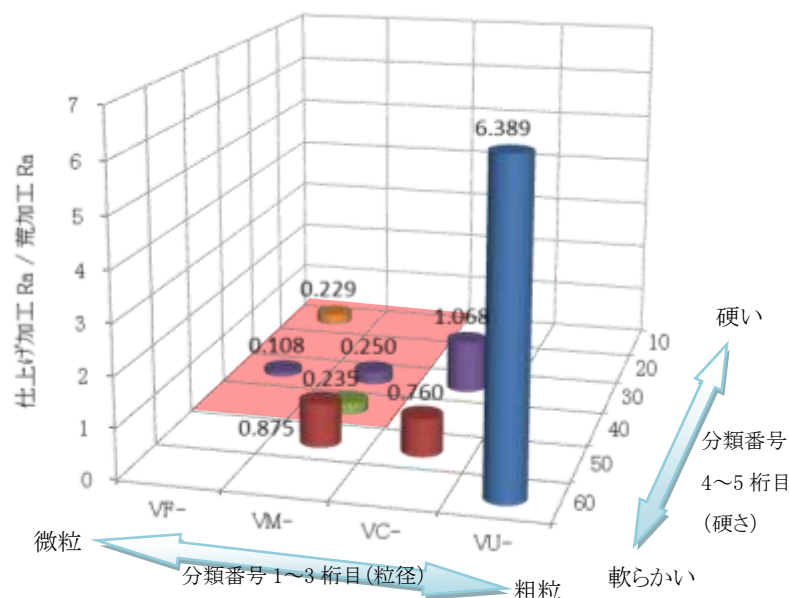


【図 8-3 超合金の材種と切削抵抗】



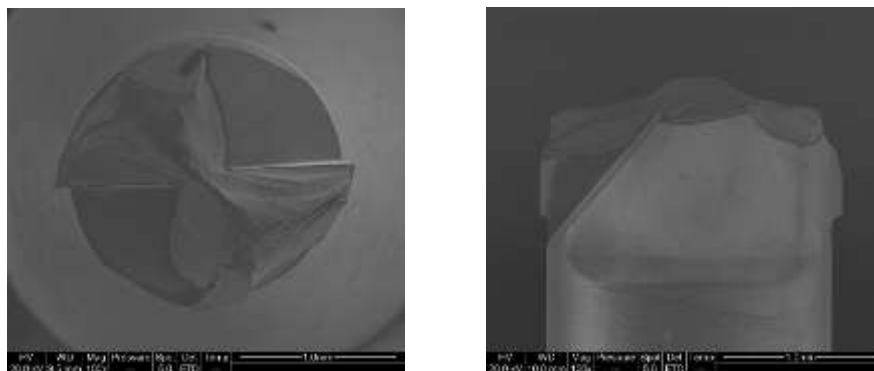
【図 8-4 超合金の材種と溝底面粗さ】

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 76mm^3 (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 76mm^3 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ラスエンドミル(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