

ダイヤモンドクイルによるマイクロルート研削に関する研究

水野 雅裕*¹, 井山 俊郎*, 浜田 智和*², 庄司 克雄*³, 厨川 常元*³

Study on Micro-Route Grinding with Electroplated Diamond Quill

Masahiro MIZUNO, Toshirou IYAMA, Tomokazu HAMADA,
Katsuo SYOJI, and Tsunemoto KURIYAGAWA

There are several problems in the micro-route grinding of ceramics with electroplated diamond quill: fracture of quill, elastic deformation of quill, dulling of the cutting grain edges, large roughness of the cut-off surface and so on. These all come from the thinness of the quill. For the purpose of solving these problems, cutoff experiments were carried out under two kinds of grinding conditions. One was under oscillating workpiece in the spindle axis direction and the other was under swinging the spindle in its axis direction. The experimental results are summarized as follows. (1) Under no oscillation of workpiece, the grinding force doesn't decrease with the reduction of the table speed. (2) When oscillating workpiece, the grinding force becomes remarkably small with the increase of workpiece frequency if the table speed is small. (3) However, the effect of workpiece oscillation becomes small when the table speed is high. (4) The roughness of cut-off surface is improved by increasing the workpiece frequency. (5) When swinging the spindle at low frequency and in large amplitude, the roughness of cut-off surface in the table feed direction becomes large because of the cyclic changing of the tool deformation.

Key words: micro-route grinding, diamond quill, ceramics, workpiece oscillation

1. 緒 言

マイクロルート研削加工システムは、セラミックスなどの難削材料に微小な穴を明けたり、自由曲線の切断・溝加工を行う目的で開発された。しかしながら使用するダイヤモンドクイル（ダイヤモンド電着軸付き砥石）の径が小さいため、クイルの折損、クイルの弾性変形、砥粒の目つぶれ、大きな加工面粗さ等が問題になっている¹⁾。

これらの問題点を解決するには、工作物あるいはクイルに、クイル軸方向の微小振動を付加することが効果的であると考えられる。振動によりクイルと工作物間のチップスペースが大きくなって研削抵抗が低減すると同時に、加工面への研削液の流入が容易になって砥粒の目つぶれが抑制されると予測されるからである。また、1個の有効砥粒切れ刃の研削作用範囲が振動の振幅の分だけクイル軸方向に広がるため、クイル軸方向の有効砥

粒切れ刃間隔が見かけ上小さくなり、切断面粗さが向上すると考えられる。そこで本論文では、工作物にクイル軸方向の微小振動を付加しながら切断加工実験を行い、微小振動が研削抵抗や切断面粗さにどのような影響を与えるかについて調べた。

2. 実験装置の概要

マイクロルート研削システムの概要を図1に示す。主軸には、回転振れが $0.2\mu\text{mP-P}$ 以下のビルトイン式高周波エアスピンドルを使用し、これによって最高120,000rpmのクイル回転数を得ることができる。また、XYテーブルの駆動にはACサーボモータを、主軸の上下送り駆動にはステッピングモータを使用している。

本実験で製作した工作物振動装置の概要を図2に示す。図のように振動装置は電磁石と板ばねから構成されており、コイルに交流電流を流すと電磁石の吸引力と板ばねの弾性回復力によって板ばねが上下方向（z方向）に振動する。振動数を変えるにはコイルに流す交流電流の周波数を変えればよいが、その調整にはインバータを用いた。また、I型鉄心とE型鉄心間のギャップをスペーサで変えることによって振幅を調整した。工作物を

* 1 岩手大学工学部 (〒020 盛岡市上田4-3-5)

* 2 岩手大学大学院 (上に同じ)

* 3 東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

学会受付日 1992年12月4日

この振動装置に固定し、周波数400Hz、振幅50 μ mで振動させたときの波形を図3に示す。測定にはレーザー式変位計を用いた。この図より、ほぼ正弦波の振動が得られることがわかる。

研削抵抗を測定するため、振動装置を抵抗線ひずみゲージ式の平行平板型2分力動力計¹⁾上に設置した。なお動力計の較正は、動力計に振動装置と工作物をセットした状態で行った。

3. 工作物の微小振動と研削抵抗

切断中のクイルの折損、弾性変形といった問題点を解決するには、研削抵抗をいかにして低減させるかが課題となる。本節では工作物にクイル軸方向の微小振動を付加しながら切断実験を行い、研削抵抗に与える微小振動の影響について調べる。

3.1 実験方法および条件

切断条件を表1に示す。ダイヤモンド電着部のクイル基材寸法は#400と#800のいずれも ϕ 0.4mm \times 2mm(長さ)とした。工作物はカーボン製のスライス台に加工用接着剤で接着し、スライス台ごと切断した。切断はx方向のテーブル移動だけによる単純な直線切断とした。

3.2 研削抵抗に与える微小振動の影響

まず、テーブル速度vを10mm/minにして切断を行い、テーブル送り方向(x方向)の研削抵抗分力

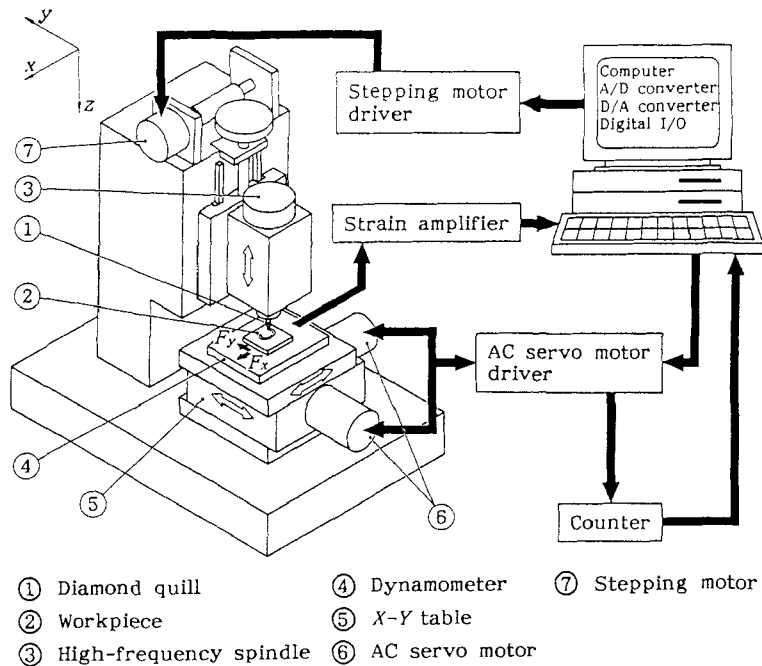


Fig.1 Outline of the micro-route grinding system

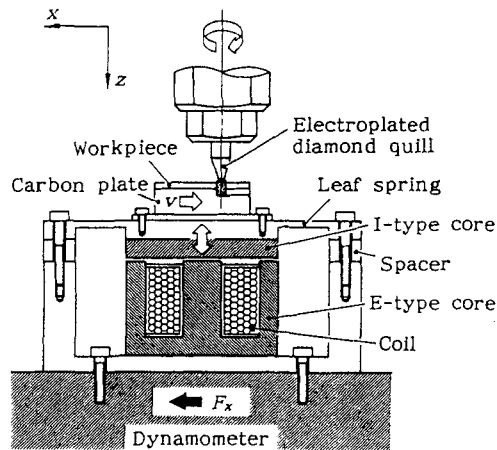


Fig.2 Setup of diamond quill, workpiece, oscillator and dynamometer

Table 1 Grinding conditions

Tool	Electroplated diamond quill
Mesh size	# 400, # 800
Size of electroplated part	# 400: ϕ 0.5 x 2.0(Length) # 800: ϕ 0.46 x 2.0(Length)
Base material	Carbide
Tool speed	120,000 rpm
Table speed v	10, 40 mm/min
Depth of cut	1.7 mm
Oscillation of workpiece	
Amplitude	50 μ m
Frequency n_w	0, 100, 400 Hz
Workpiece	AlN ceramics
Size	25.5(Lenith) x 25.5(Width) x 0.8(Thickness)
Workpiece mount	Carbon
Grinding fluid	Water soluble type

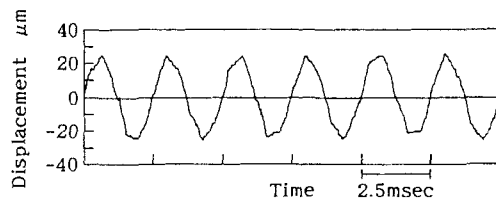


Fig.3 Workpiece oscillation

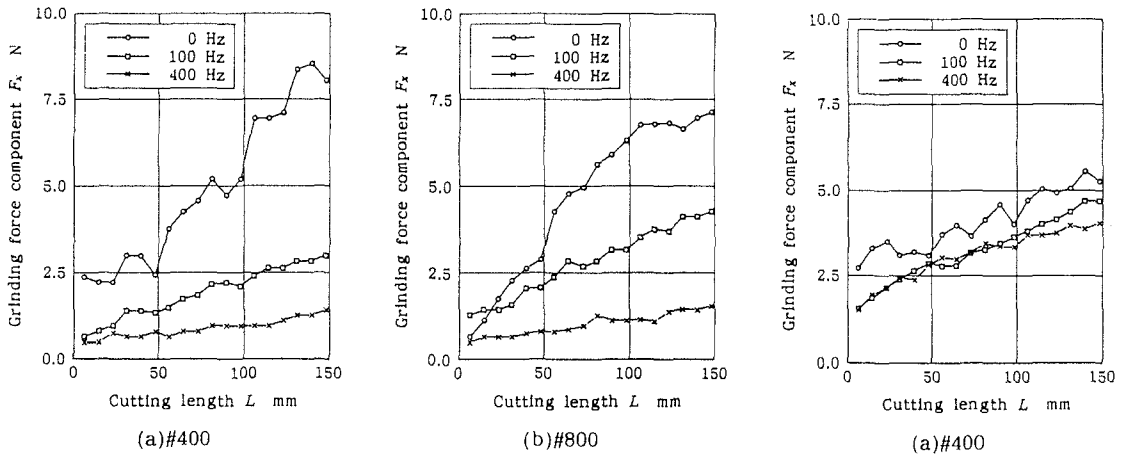


Fig.4 Influence of workpiece frequency on F_x under $v=10\text{mm/min}$

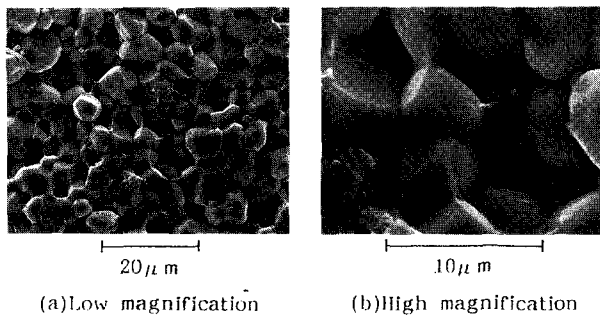


Fig.6 SEM photographs of cut-off surface of AlN

F_x に与える微小振動の影響を調べた。なお、 F_y は F_x の1/10以下となるので議論の対象にしないことにした。図4(a),(b)はそれぞれ#400, #800のクイルを用い、工作物に0Hz, 100Hz, 400Hzの微小振動を付加しながら切断を行ったときの実験結果を、切断距離 L を横軸に、 F_x を縦軸にとって示したものである。いずれの場合も F_x は切断距離 L の増加に伴って単調に増加しているが、振動数が高いほどその増加率は小さくなっており、振動による研削抵抗の低減効果が明らかに認められる。

次に、 $v=40\text{mm/min}$ で同様の実験を行った。#400と#800のクイルによる実験結果をそれぞれ図5(a),(b)に示す。図から、 v を大きくすると振動による研削抵抗の低減効果が現れなくなることがわかる。

また、0Hz(振動無付加)の実験結果について図4と図5を比較すると、 v を単に小さくしても F_x は低減しないことがわかる。

4. マイクロルート研削における研削機構

工作物に微小振動を与えずに切断を行った場合、

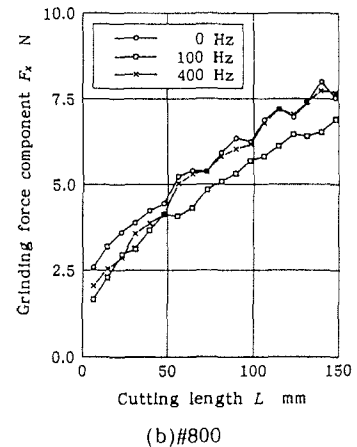


Fig.5 Influence of workpiece frequency on F_x under $v=40\text{mm/min}$

前節の実験結果のようにテーブル速度 v を単に小さくしても F_x は低減しない。これは、セラミックスのような焼結体をクイルのような剛性の低い工具で研削した場合に生じる特別な現象と考え、次のように考察した。

本実験で工作物として使用した窒化アルミセラミックスの平均粒径は約 $5\mu\text{m}$ である。いまダイヤモンド電着部のクイル径を 0.5mm 、クイル回転数を $120,000\text{rpm}$ とし、簡単のために、有効砥粒切れ刃が1個しか存在しないクイル軸に垂直なある断面での研削機構を考える。弾性変形によるクイルの逃げや振動などの影響を無視してクイル1回転当りの砥粒切込み深さを計算すると、その値は $v=10\text{mm/min}$ のとき約 $0.08\mu\text{m}$ 、 $v=40\text{mm/min}$ のとき約 $0.33\mu\text{m}$ となる。これらの値は窒化アルミセラミックスの粒径に比べて非常に小さい。もし仮にク

イルが剛体で、しかも窒化アルミ粒子が粒界から脱落することなしに少しずつ切削されて除去されるとしたら、1個の窒化アルミ粒子は $v=10\text{mm/min}$ のとき約60回の切削回数で、 $v=40\text{mm/min}$ のときは約15回の切削回数で除去される計算になる。当然この切削回数は、同一断面上に存在する有効砥粒切れ刃の数に比例して多くなる。しかしながら、窒化アルミ粒子が粒界から脱落することなしに少しずつ切削されて除去されるとは考えにくい。窒化アルミ粒子の粒界は粒子自体の強度に比べてはるかに弱く、衝撃力によって容易に破壊されるからである。

#400のクイルを用い、 $v=10\text{mm/min}$ で振動を付加せずに切断を行って得られた切断面のSEM写真を図6に示す。切削作用により塑性流動を起こした粒子や、脆性破碎した粒子も一部には観察されるが、明らかに粒界破壊が支配的である。図6(b)に、粒界破壊により粒子が脱落してできたと思われる痕跡の拡大写真を示す。

図7(a)は、クイル軸に垂直なある断面において、 x 方向に並んでいる窒化アルミ粒子が砥粒切れ刃によって除去される様子を模式的に描いたものである。砥粒切れ刃とスピンドル回転中心との間に描いたスプリングはクイルの弾性を表している。窒化アルミ粒子に対する砥粒切れ刃の作用は、工作物とクイルの相対位置の変化に伴い、図①から図②のように変化すると考えられる。砥粒切れ刃は粒子Aに接触するとしばらくの間、粒子Aに対して図①のように弾性接触を繰り返す。そして図②のように粒子Aを粒界から脱落させると、時間をおいて次の粒子Bに接触する(図③は砥粒切れ刃が粒子Bに接触する直前の状態である)。同図(b)は、窒化アルミ粒子A, B, Cに作用する砥粒切れ刃の衝撃力の変化を示したものである。図中の番号と記号は図(a)のそれらに対応している。図(D)の [I] と [II] はいずれも振動無付加の場合の

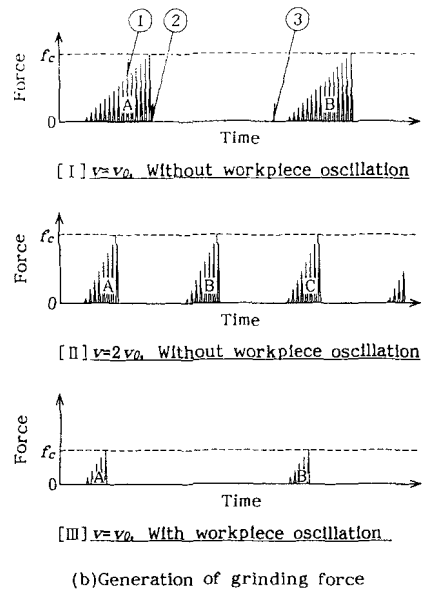
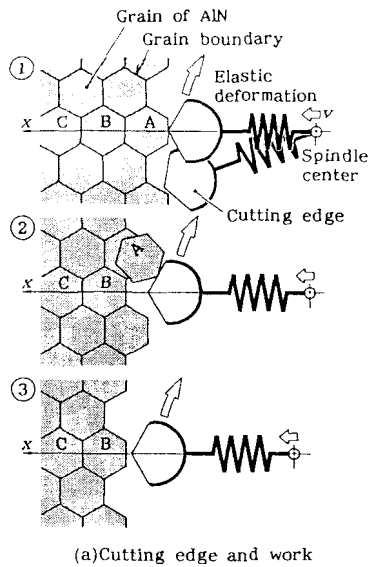


Fig.7 Grinding mechanism

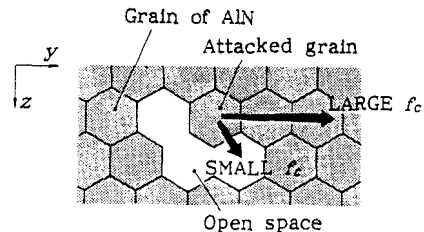


Fig.8 Difference of the critical value f_c by its acting direction

衝撃力の変化であり、[I]は $v=v_0$ (ある速度)とした場合、[II]は $v=2v_0$ とした場合である。図のように粒子に作用する衝撃力はクイルの弾性変形量の増加とともに徐々に増大し、それがある臨界値 f_c を越えたとき、粒子は粒界が破壊して脱落すると考えられる。 v が小さい場合、[I]のように粒子に作用する衝撃力の上昇率は小さくなり、臨界値 f_c に達するまでの間に粒子が受ける衝撃回数は多くなる。しかし砥粒切れ刃が粒子Aを脱落させた後、粒子Aと隣合っていた次の粒子Bに接触するまでの時間間隔は長くなる。一方、 v が大きい場合はその時間間隔は[II]のように短くなるが、衝撃力が臨界値 f_c に達するまでの衝撃回数は少なくなる。いま実験で測定している研削抵抗抗力 F_x は、すべての砥粒切れ刃によって発生する衝撃力の x 方向成分の和を時間で平均したものである。したがって、上述した研削機構を考えれば v が小さくなくても F_x は低減しないことに

なる。

振動付加により F_x が低減するのは、次の二つの理由によると考えられる。ひとつは衝撃力そのものが増大し、衝撃力の上昇率が [III] のようになると大きくなることである。このとき、衝撃力が臨界値 f_c に達するまでの衝撃回数が少なくなり、 F_x は低減する。もうひとつは粒子に作用する衝撃力のベクトル方向がクイル1回転ごとに変化することである。臨界値 f_c の大きさは、図8のように衝撃力のベクトル方向によって大きく異なる。したがって、工作物に振動を付加すると衝撃力のベクトル方向が変化し、窒化アルミ粒子はより低い臨界値 f_c で脱落するようになる。

v を大きくすると振動を付加しても F_x が低減しなくなるのは、次の理由によると考えられる。 v の増加にともない、衝撃力が臨界値 f_c に達するまでの衝撃回数は少なくなる。そして v をさらに大きくすると1回程度の衝撃回数で粒子は脱落するようになる。このとき、粒子に対するクイルの弾性接触の影響が小さくなり、振動による研削抵抗の低減効果は現れなくなる。

振動による研削抵抗の低減効果はガラス材（ホウケイ酸ガラスを使用）においても認められた。しかし、窒化アルミセラミックスの場合とは異なり、ガラスの場合は v を小さくすれば研削抵抗は低減した。#400のクイルを用い、テーブル速度 $v = 10\text{mm/min}$ で、振動を付加せずにガラス材を切断したとき得られた切断面の SEM 写真を図9に示す。切削作用により塑性流動を起こしている部分と微小な脆性破砕を起こしている部分が観察される。ガラス材において振動による研削抵抗の低減効果が現れるのは、脆性破砕による材料除去が支配的になるためであると考えられる。

5. 工作物の微小振動と切断面粗さ

次に、切断面粗さに与える工作物の微小振動の影響について調べた。#800のクイルを用い、テーブル速度 v を 10mm/min にして直線切断を行ったときの切断面の z 方向のプロファイルを図10に示す。同図(a), (b)はそれぞれ、振動無付加の場合と400Hzの振動を付加した場合のプロファイルである。切断面粗さはいずれも比較的大きいが、振動を付加することによって粗さが向上することがわかる。このプロファイルから十点平均粗さ R_z を測定し、 R_z に与える振動数 n_w の影響をプロットしたの

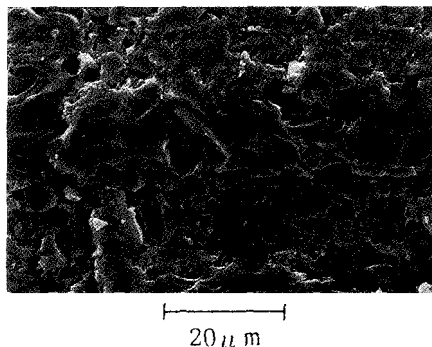


Fig.9 SEM photograph of cut-off surface of glass

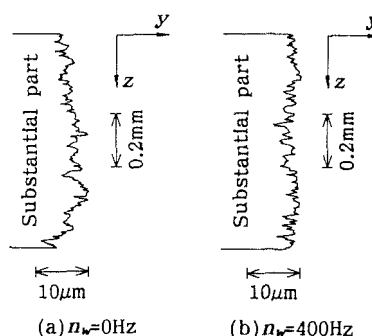


Fig.10 Profiles of cut-off surfaces under $v = 10\text{mm/min}$

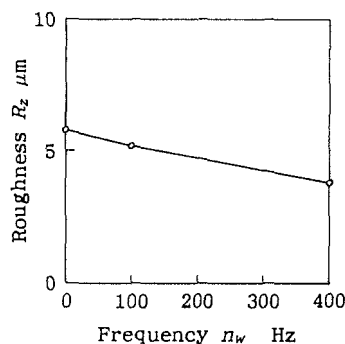


Fig.11 Influence of workpiece frequency n_w on roughness R_z

が図11である。図のように n_w の増加に伴って R_z は小さくなる。

以上の結果を次のように考察した。振動無付加の場合、クイルを回転させたときのクイルの輪郭形状がそのまま切断面に転写されるので、その凹凸よりも小さな切断面粗さを期待することはできない。しかし工作物を振動させると、それぞれの有効砥粒切れ刃の研削作用範囲が振動の振幅の分

だけ z 方向に広がるため、クイル軸方向の有効砥粒切れ刃間隔が見かけ上小さくなり、切断面粗さが向上する。また、振動を付加すると、粒子を脱落させるのに必要な衝撃力 f_c が低減し、工作物に生じるマイクロクラックの深さが浅くなることも理由のひとつと考えられる。

6. クイルの揺動と切断面粗さ

切断面粗さと平坦度をさらに向上させようと考え、ステッピングモータにより、クイル(#800)を低周期(0.2Hz)の大振幅(0.4mm)で z 方向に揺動させながら切断実験を行った。なお揺動に伴うクイルの切込み深さの変化は1.3~1.7mmとし、工作物には振動を付加しなかった。また、テーブル速度 v は10mm/minとし、それ以外の研削条件は表1に従った。

この切断実験で得られた切断面の z 方向のプロファイルを図12(a)に示す。切断面粗さが向上することを期待して実験を行ったが結果は逆であった。同図(b)に切断面の x 方向(テーブル送り方向)のプロファイルを示す。図のように x 方向のプロファイルにはクイルの揺動の周期に一致するうねりが生じた。これはクイルの揺動に伴い、クイルの弾性変形量が y 方向に周期的に変動することを示唆している。このようにクイルの弾性変形量が周期的に変動するのは、クイルの xy 平面方向のコンプライアンスが力の作用する位置によって大きく異なるためである。参考のために、クイルを揺動させずに切断を行って得られた切断面の x 方向のプロファイルを図13に示す。図のようにこの場合は切断面に周期的なうねりは見られない。

7. 結 言

ダイヤモンドクイル(微小径ダイヤモンド砥石)によるマイクロルート研削加工システムには、クイルの折損、クイルの弾性変形、砥粒の目つぶれ、大きな加工面粗さ等の問題がある。これらの問題を解決するため、本論文では工作物にクイル軸方向の微小振動を与えながら切断実験を行い、研削抵抗や切断面粗さに与える影響を調べた。また、クイルを軸方向に揺動させながら切断実験を行い、切断面粗さに対する影響を調べた。結果を要約すると次のようになる。

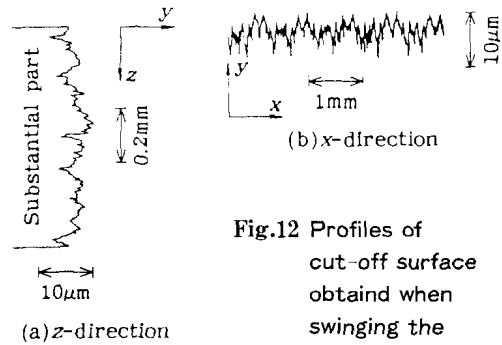


Fig.12 Profiles of cut-off surface obtained when swinging the spindle

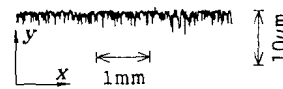


Fig.13 The x -direction profile of cut-off surface obtained without swinging the spindle

- (1) 工作物に振動を付加しない場合、テーブル速度 v を小さくしてもテーブル送り方向の研削抵抗分力 F_x は低減しない。
- (2) v が小さい場合、付加する振動の振動数が高いほど F_x は低減する。
- (3) v が大きい場合、振動による F_x の低減効果は現れなくなる。
- (4) 切断面粗さは付加する振動の振動数が高いほど向上する傾向にある。
- (5) 低周期の大振幅でクイルを軸方向に揺動させながら切断を行った場合、切断面は工作物送り方向に周期的なうねりを持つ。

謝 辞

本研究で使用したダイヤモンドクイルは大阪ダイヤモンド工業(株)から、また窒化アルミセラミックスは(株)トーキンから御提供いただいた。さらに振動装置を製作するにあたり、本研究室技官・吉田宏氏の協力を得た。併せてここに深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 庄司克雄, 厨川常元, 田口淳: 微小径ダイヤモンド砥石によるマイクロ加工の試み, 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集(1990)611.