

# 超精密切削加工された Al 合金の仕上げ面性状に及ぼす 工具摩耗の影響（第 2 報）\*

— 単結晶ダイヤモンド R 刃バイトの切れ刃の摩耗が表面粗さに及ぼす影響 —

近藤英二\*\* 岩本竜一\*\*\* 田中一平† 皮籠石紀雄††

Effects of Tool Wear on Surface Integrity of Aluminum Alloy Machined in Ultra-Precision Cutting Process (2<sup>nd</sup> Report)  
— Effects of Tool Wear of Single Crystal Diamond Tool with Large Nose Radius on Surface Roughness —

Eiji KONDO, Ryuichi IWAMOTO, Ippei TANAKA and Norio KAWAGOISHI

Ultra-precision cutting of soft metals is mainly used for generating reflection surface of optical equipments. Accordingly roughness of machined surface is very important evaluation item in quality because the roughness affects performance of the optical equipments. Workpieces are actually machined with a worn diamond tool in machining shops whereas ultra-precision cutting with a single crystal diamond tool is well known as a machining method owing high quality finished surface to a sharp cutting edge of the tool. The purpose of this study is to find out the relation between tool wear and surface roughness machined with a worn tool in ultra-precision cutting process. Profile of a machined surface was measured at intervals of a fixed cutting distance, and profile curves in cutting and feed directions were investigated by using spectrum analysis. As a result of experiments and considerations, we reached the following results. (1) Cutting tool vibrations induced by tool flank wear increased roughness of machined surface in cutting direction and also increased roughness in feed direction. (2) Deterioration of copying of cutting edge shape decreased surface roughness in feed direction. (3) Surface roughness generated by tool vibrations exponentially increased with increase in flank wear of cutting edge generating finished surface.

**Key words:** single crystal diamond tool, tool wear, ultra-precision cutting, aluminum alloy, surface roughness

## 1. 緒 言

単結晶ダイヤモンド工具を使った軟質金属の超精密切削加工は、主として光学機器の反射面の仕上げ加工に使われているが、仕上げ面の粗さは光学機器の性能に大きく影響するため、品質上極めて重要な項目であり<sup>1)</sup>、これまでに多くの研究がなされている<sup>2)~9)</sup>。

超精密切削加工はダイヤモンド工具の鋭利な切れ刃により高品位な仕上げ面が得られる加工法とされているが、実際の加工現場ではある程度摩耗した工具で切削加工をしている。Al 合金の超精密切削加工における仕上げ面粗さの生成要因として結晶粒間の結晶方位の違いが指摘され<sup>2)~4)</sup>、また切削条件、工具摩耗は仕上げ面粗さに影響することが報告されている<sup>5)~9)</sup>。しかしながら、工具摩耗が仕上げ面の粗さに及ぼす影響については、切削距離が長くなるのに伴って工具が摩耗し、仕上げ面の粗さも変化することが指摘されるに留まっており、工具摩耗量と仕上げ面粗さとの定量的な関係は示されていない。また工具摩耗による仕上げ面粗さの生成機構について、平刃バイトについては検討されているが<sup>6)</sup>、R 刃バイトについてはなされていない。

本研究は超精密切削加工された Al 合金の仕上げ面粗さと工具摩耗との関係を明らかにすることを目的とし、単結晶ダイヤモンドの R 刃バイトでアルミニウム合金製の被削材を切削加工し、工

具の摩耗と仕上げ面の粗さとの関係を定量的に調べた。

## 2. 実験方法

実験には超精密三次元曲面加工機を用い、直径 197 mm の Al 合金製の被削材を単結晶ダイヤモンドの R 刃バイトで正面旋削した。実験に用いた切削工具は、図 1(a)に示すように、ダイヤモンドのチップを小さな台板にろう付けし、その台板を工具ホルダーにねじで固定する構造になっている。また加工硬化と残留応力を除去するため、被削材は切削実験を行なう前に、真空炉を用いて熱処理した（500℃で 1 時間保持後に炉冷）。

仕上げ面粗さの測定では、一定の切削距離毎に被削材を図 1(b)に示す直径 30 mm の被削材に交換して正面旋削し、測定用の被削材とした。また、新しい工具と摩耗した工具（切削距離 2415 km）により図 1(b)に示した被削材を切削し、切込み深さと工具送り量

Table 1 Experimental conditions

Tool	Material	Single crystal diamond			
	Corner radius	mm	2		
Rake angle	deg.	0			
Clearance angle	deg.	4			
Workpiece	Material	JIS A5056			
	Diameter	mm	197 (, 30)		
	Heat treatment	Annealed			
	Hardness	Hv	63		
Feed rate	$f$	$\mu\text{m}/\text{rev}$	40	40	10 ~ 80
Depth of cut	$d$	$\mu\text{m}$	30	5 ~ 50	10
Cutting distance	$L$	km	0~2415	New, 2415	
Spindle speed	rpm	1000			
Cutting fluid	Kerosene				

\* 原稿受付 平成 17 年 6 月 23 日

\*\* 正 会 員 鹿 児 島 大 学 工 学 部 ( 鹿 児 島 県 鹿 児 島 市 郡 元 1-21-40)

\*\*\* 正 会 員 鹿 児 島 県 工 業 技 術 セ ン タ ー ( 鹿 児 島 県 始 良 郡 隼 人 町 小 田 1445-1)

† コマツ電子金属㈱ (宮崎県宮崎郡清武町大字木原 1112)

†† 鹿児島大学工学部 (鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

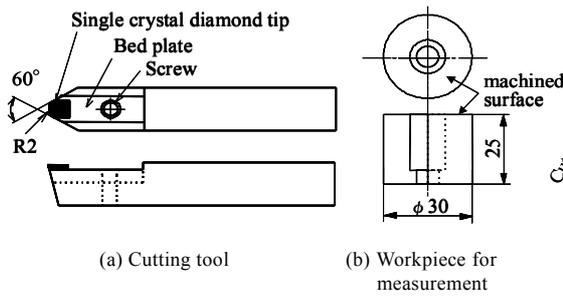


Fig. 1 Cutting tool and workpiece used for measurement

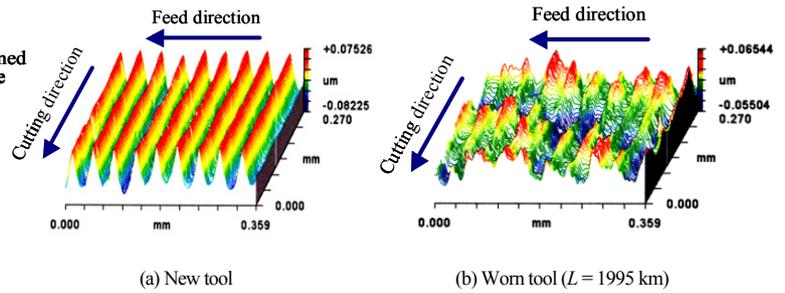
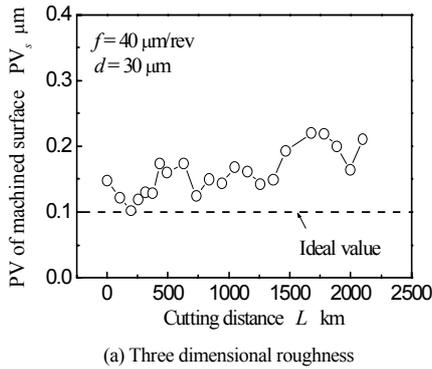
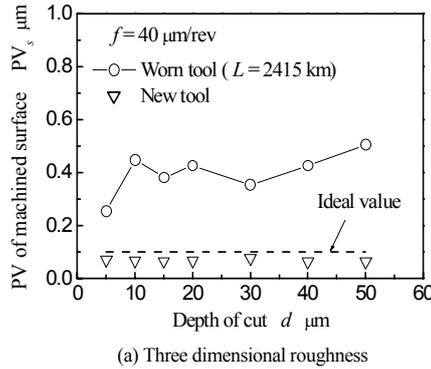


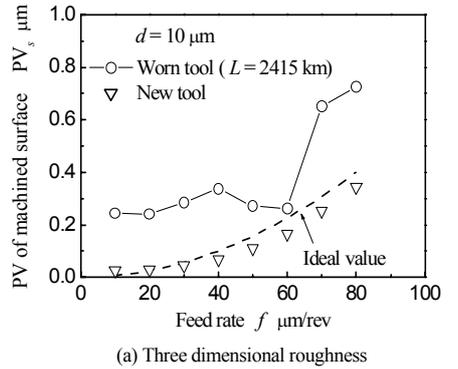
Fig. 2 Air views of machined surfaces



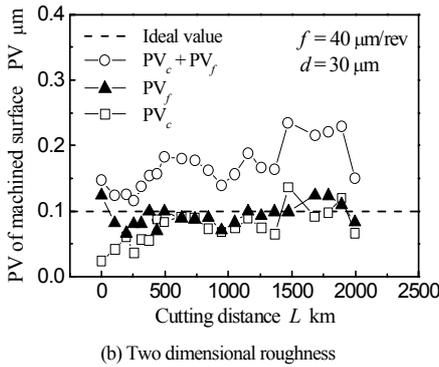
(a) Three dimensional roughness



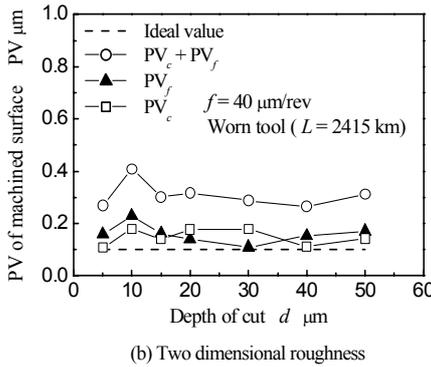
(a) Three dimensional roughness



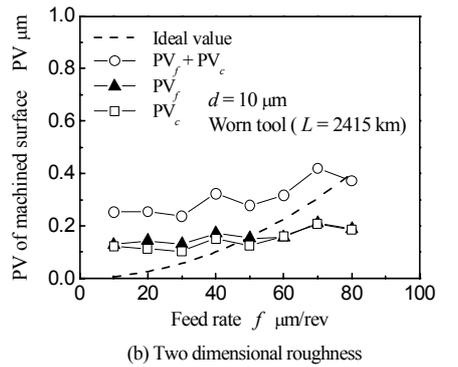
(a) Three dimensional roughness



(b) Two dimensional roughness



(b) Two dimensional roughness



(b) Two dimensional roughness

Fig. 3 PV of machined surface with increase in cutting distance

Fig. 4 PV of machined surface with increase in depth of cut

Fig. 5 PV of machined surface with increase in feed rate

の影響も調べた。詳細な実験条件を表 1 に示す。得られた測定用の被削材は、仕上げ面の粗さを走査型白色干渉計により観察し、仕上げ面の 3 次元粗さの PV 値、切削方向と工具送り方向の 2 次元粗さの PV 値を求めた。また得られた切削方向と工具送り方向の断面曲線のスペクトルも求めた。

### 3. 仕上げ面の 3 次元と 2 次元の粗さ

図 2 は走査型白色干渉計で測定した仕上げ面の形状である。図 2(a)で示した新しい工具での仕上げ面には規則正しいカッターマークが見られる。しかし、図 2(b)で示した摩耗した工具（切削距離 1995 km）での仕上げ面では、カッターマークはほとんど見られない。

図 3 は切削距離  $L$  に対する仕上げ面粗さの PV 値である。図 3(a)で示した  $PV_s$  は、仕上げ面の 3 次元粗さの PV 値で、図中の破線は、工具のノーズ半径と工具の送り量から求められる理論粗さである。○印で示した  $PV_s$  の測定値は、切削の初期では理論粗さ程度の大きさであるが、切削距離  $L$  の増加に対して増減を繰り返しながら大きくなり、 $L$  が約 1500 km 以上では理論粗さの約 2 倍の大きさに達している。図 3(b)で示した  $PV_c$  は切削方向の断面曲線から求めた 2 次元粗さの PV 値、 $PV_f$  は工具送り方向の 2 次元粗さ

の PV 値である。切削方向の理論粗さは 0 であり、□印で示した  $PV_c$  の測定値も切削の初期ではほぼ 0 であるが、 $L$  の増加に伴って約 500 km までは急激に大きくなり、その後ほぼ一定を保ち、1400 km 以上で再びやや増加している。一方、▲印で示した  $PV_f$  の測定値は、 $L$  の増加に対してほぼ一定になっているが、1500 km 以上でやや増加している。図 3(b)には、 $PV_c$  と  $PV_f$  の測定値の和が○印で示してあるが、その大きさと切削距離  $L$  に対する変化の傾向は、図 3(a)で示した仕上げ面の 3 次元粗さの PV 値  $PV_s$  とほぼ同じである。これは、図 2 に示したように、切削方向の振動痕は、工具送り方向に対して位相差が小さいため、切れ刃の形状により決まる成分と切削方向の振動痕の成分とがほぼ独立した成分として 3 次元粗さに寄与したものと考えられる<sup>11)</sup>。

図 4 は切込み深さ  $d$  の増加に対する仕上げ面粗さの PV 値であり、図 4(a)は仕上げ面の 3 次元粗さの PV 値である。図中の▽印は新しい工具での測定値で、ほぼ理論粗さに近い大きさであり、また切込み深さ  $d$  の増加に対し、ほとんど変化していない。図中の○印は摩耗した工具（切削距離 2415 km）での測定値で、切込み深さ  $d$  が 5  $\mu\text{m}$  と小さい場合を除き、 $d$  の増加に対する大きな変化はないが、数 10  $\mu\text{m}$  あたりでやや小さくなる傾向が見られた<sup>7)</sup>。図 4(b)において□印で示した切削方向の粗さ  $PV_c$ 、▲印で示した

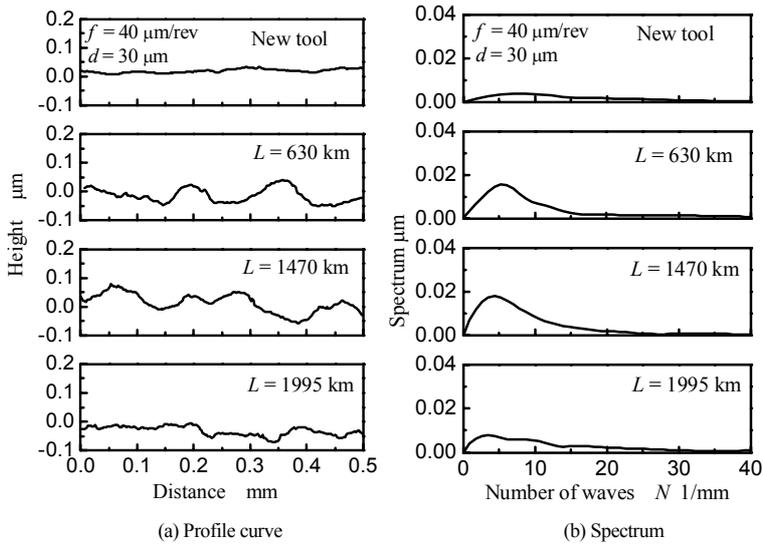


Fig. 6 Profile curve in cutting direction and its spectrum with increase in cutting distance

工具送り方向の粗さ  $PV_f$  の測定値, および○印で示した  $PV_c$  と  $PV_f$  の和も,  $d$  の増加に対する大きな変化は見られない. また,  $PV_c$  と  $PV_f$  の和の切込み深さ  $d$  に対する変化の傾向は, 図 4(a) で示した 3 次元の粗さの測定値とほぼ同じである.

図 5 は工具送り量  $f$  の増加に対する仕上げ面粗さの  $PV$  値である. 図 5(a) は仕上げ面の 3 次元粗さの  $PV$  値で, 図中の▽印は新しい工具での測定値であり, ほぼ理論粗さに近い大きさになっている. 図中の○印は摩耗した工具 (切削距離 2415 km) での測定値で, 工具送り量が  $60 \mu\text{m}/\text{rev}$  以下はほぼ一定値になっているが,  $60 \mu\text{m}/\text{rev}$  よりも大きくなると急増し,  $80 \mu\text{m}/\text{rev}$  では理論粗さの約 2 倍になっている. 図 5(b) において, □印で示した切削方向の粗さ  $PV_c$ , ▲印で示した工具送り方向の粗さ  $PV_f$  の測定値, および○印で示した  $PV_c$  と  $PV_f$  の和も,  $f$  の増加に対し,  $60 \mu\text{m}/\text{rev}$  まではほぼ一定値になっている. しかし,  $60 \mu\text{m}/\text{rev}$  以上では図 5(a) で示した摩耗した工具での粗さと異なり,  $f$  の増加に対する  $PV_c$ ,  $PV_f$  の和と  $PV_c$  との差は大きくなっている. これは,  $f$  が大きいところでは局所的に粗さが大きくなる部分が発生したためと推定される.

#### 4. 切削方向の仕上げ面粗さの生成機構

図 6(a) は仕上げ面の切削方向の断面曲線であり, 切削距離  $L$  をパラメータとして示してある. 切削方向の粗さは理論的には 0 であり, 切削の初期では凹凸は小さいが,  $L$  が 630 km, 1470 km で大きな凹凸が見られ, 1995 km では凹凸は逆に小さくなっている. 図 6(b) は図 6(a) で示した断面曲線のスペクトルであり, 断面曲線では明確でなかったが, 切削距離  $L$  が増加すると波数が 5 程度の成分が大きくなっている. 図 7 は切削距離  $L$  に対する断面曲線のスペクトルのピーク値  $P_c$  で,  $L$  が 500 km までは  $L$  の増加に伴って急激に大きくなるが, それ以降は大きな変動は見られるものの, 全体的には増加または減少するといった一定の傾向は見られず, 図 3(b) で示した切削距離  $L$  の増加に対する  $PV_c$  の傾向とほぼ一致している. また図 8 は, 図 6(b) で示したスペクトルのピークでの波数であり, 変動は見られるものの, 切削距離  $L$  が 500 km 以上の平均値は約 4 である. 従って, 切削距離の増加に伴う粗さの主要な原因は, 波数が約 4 (波長約  $250 \mu\text{m}$ ) の成分であると考えられる.

これまでの研究によれば, 仕上げ面の粗さの原因として結晶粒

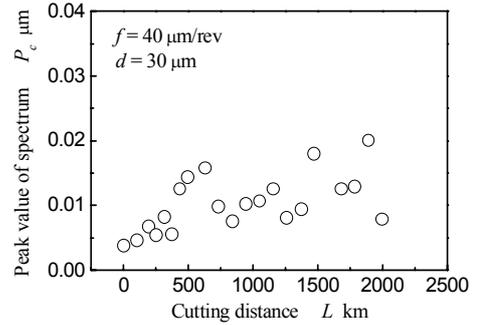


Fig. 7 Peak value of spectrum with increase in cutting distance

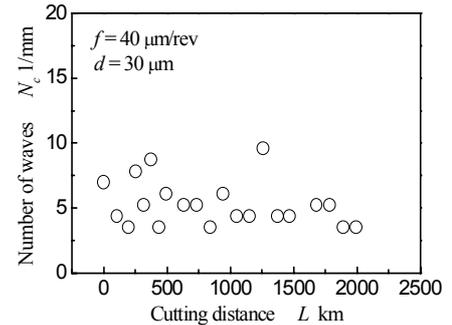


Fig. 8 Number of waves of spectrum at peak with increase in cutting distance

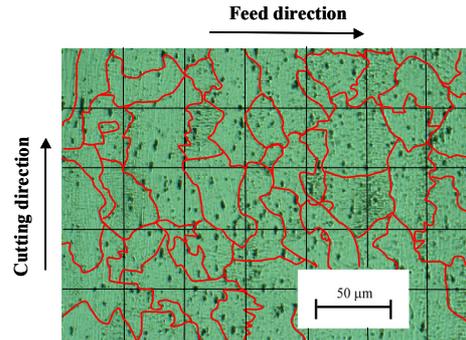


Fig. 9 Crystalline structure of machined surface

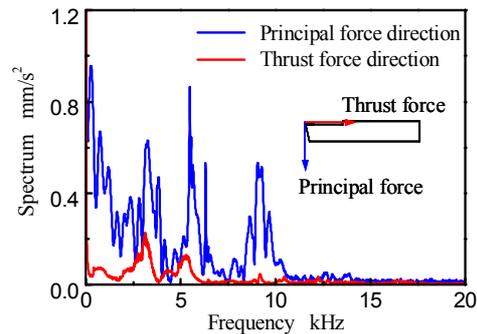


Fig. 10 Spectra of free vibration of cutting tool

間の結晶方位の違いが指摘されている<sup>3)4)</sup>. 図 9 は仕上げ面をエッチングして得られた微分干渉顕微鏡写真である. 得られた写真では, 結晶粒界が明瞭でなかったため, ここでは便宜的に粒界をオレンジ色の線で示した. また工具送り量  $40 \mu\text{m}/\text{rev}$  に対応させ, 写真にはピッチが  $40 \mu\text{m}$  の格子が示してある. 結晶粒の大きさは一定でなく, かなりのばらつきは見られるが, 切削方向に対する粒界のピッチを写真から読み取り, その分布を調べたところ, 数

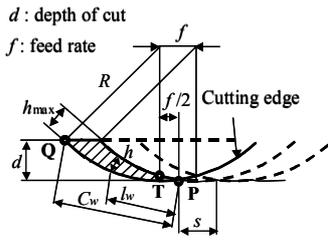


Fig. 11 Conceptual figure of cutting process by cutting edge with large nose radius

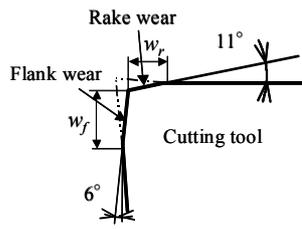


Fig. 12 Conceptual figure of cross section of worn cutting edge

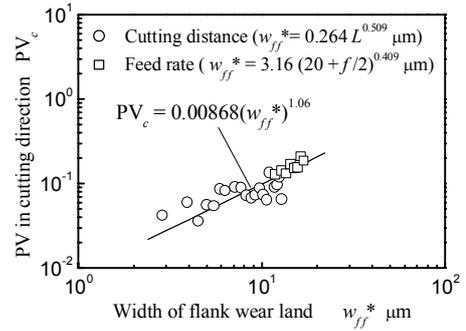


Fig. 13 PV in cutting direction with increase in width of flank wear land

10 $\mu\text{m}$ 程度であった.これを1mm当り,つまり波数に換算すると,その値は約50であり,図8で示した断面曲線のスペクトルのピークでの波数4とは大きく異なっている.従って,この結果から,工具摩耗により増加した仕上げ面の粗さの原因が結晶粒の結晶方位の違いによる段差であるとは考え難い.

図10はインパルス加振して得られた切削工具系の振動特性であり,青色が主分力方向,赤色が背分力方向の振動特性である.背分力方向の切削工具系の振動は工具刃先と被削材との相対変位を生じ,結果として仕上げ面に振動痕が残ることになる.得られた振動特性から,切削工具系の背分力方向の固有振動数は約3kHzと約5kHzであり,主分力方向の振動特性にもこれらの振動数で大きなピークが見られる.一方,仕上げ面の粗さを測定した位置は,被削材の中心から約14mmであり,被削材の切削速度が1000rpmであるから,切削方向の凹凸の波数を4とすれば,振動数は約6kHzであり,切削工具系の背分力方向の固有振動数とほぼ一致する.

以上のことから,工具の摩耗に伴う切削方向の仕上げ面の粗さの増加は,工具の摩耗により仕上げ面が加工硬化し<sup>10)</sup>,またこの加工硬化により仕上げ面の変形抵抗が大きくなって動的切削過程がやや不安定になり,自励的な振動が大きくなったためと推定される.ここで結晶粒間の結晶方位の違いによる強制振動的な要因は,自励的な振動を生じさせる原因として作用したと考えられる.

図11は切れ刃先端部の概念図である.これまでの研究によれば,切削工具の切れ刃は,P点からQ点までの円弧で示される被削材と工具との接触部において,切削距離の増加に伴い,図12に示すような工具の摩耗を生じる<sup>10)</sup>.また仕上げ面の硬さ,残留応力は工具逃げ面の摩耗の増加に伴って大きくなり,その大きさは図11のsで示した仕上げ面を創成する切れ刃部(P点からの距離 $l_w$ が0~fの範囲)における切取り厚さと逃げ面の摩耗幅により決まることが報告されている<sup>10)</sup>.そこで,図13には,図3と図5で示した切削方向の仕上げ面の粗さ $PV_c$ と逃げ面の摩耗幅 $w_{ff}^*$ との関係を示した.ここで, $w_{ff}^*$ は,仕上げ面を創成する切れ刃部( $l_w$ が0~fの範囲)における摩耗幅の最大値( $l_w=f$ での摩耗幅)で,図13に示した $w_{ff}^*$ の実験式から求めた<sup>10)</sup>.図13には,図3で示した切削距離Lに対する切削方向の仕上げ面の粗さ $PV_c$ が○印,図5で示した工具送り量fに対する粗さ $PV_c$ が□印で示してある.また図中には $PV_c$ が $w_{ff}^*$ に対して指数関数的に増加すると仮定し,最小二乗法により求めた実験式の値を直線で示してある.粗さ $PV_c$ の測定値は,ばらつきは見られるものの,実験式の値に沿って増加している.得られた実験式の $w_{ff}^*$ の指数は1.06で1に近く,従って $PV_c$ は $w_{ff}^*$ の値にほぼ比例して大きくなったと言える.

## 5. 工具送り方向の仕上げ面粗さの生成機構

図14は工具送り方向に測定した仕上げ面の断面曲線とそのスペクトルで,切削距離Lをパラメータとして示してある.図14(a)の断面曲線において,切削の初期では明瞭なカッターマークが見られる.しかし,L=630kmではカッターマークはわずかに見られるだけになっているが,一方ではうねりが生じている.切削距離Lが1470kmになるとこの傾向はさらに強くなるが,L=1995kmではカッターマークとほぼ同じ間隔で,かえりと推定される凸部が見られるようになる.図14(b)のスペクトルは,図14(a)の断面曲線で見られた傾向をより明確に示している.切削の初期ではカッターマークに起因する波数が25(工具の送り量は40 $\mu\text{m}/\text{rev}$ )で大きなピークが生じているが,その他に目立ったピークは見られない.切削距離Lが630kmでは,波数25のピーク値は小さくなるが,一方で波数が約3のところでは小さなピークが現れている.切削距離Lが1470kmでは,波数25のピークの大きさはさらに小さくなるが,かえりの発生によりL=1995kmでは逆に大きくなっている.

図14(b)で示したスペクトルのピーク値を図15,ピークでの波数を図16に,それぞれ切削距離Lに対して示した.図15の▲印はカッターマークによるピークの大きさ $P_i$ ,□印はうねり成分のピークの大きさ $P_u$ ,○印は $P_i$ と $P_u$ の和である.▲印で示したカッターマークによるピーク値 $P_i$ は,切削の初期段階で急激に小さくなり,それ以降では切削距離Lの増加に対して大きく増減を繰り返している.また図16に示した記号は図15のピーク値に対応させてあるが,▲印で示したカッターマークによるピークでの波数 $N_i$ は,切削距離に関係なくほぼ一定で,約25である.一方,□印で示したうねり成分のピーク値 $P_u$ は,Lが500kmまではLの増加に伴って徐々に大きくなり,それ以降ではほぼ一定になっている.このような切削距離Lに対する変化の傾向は,図7で示した切削方向での断面曲線のスペクトルのピーク値 $P_u$ で見られたものと同様である.図16において□印で示したうねり成分の波数 $N_u$ は,切削距離Lの増加に対してほぼ一定になっているが,その大きさは約3であり,図8で示した仕上げ面の切削方向の凹凸の波数4と異なっている.これは,従来の研究で指摘されているように<sup>11)</sup>,切削工具と被削材との相対振動により生じる切削方向の凹凸は,工具送り方向では振動数と被削材の回転速度との関係で位相差を生じるためであると考えられる.従って,工具送り方向の仕上げ面粗さに生じたうねり成分は,切削工具系の振動に起因するものと推定される.

図15において○印で示した $P_i$ と $P_u$ の和は,切削距離Lの増加に対し,切削の初期段階で急減し,それ以降は増減を繰り返すも

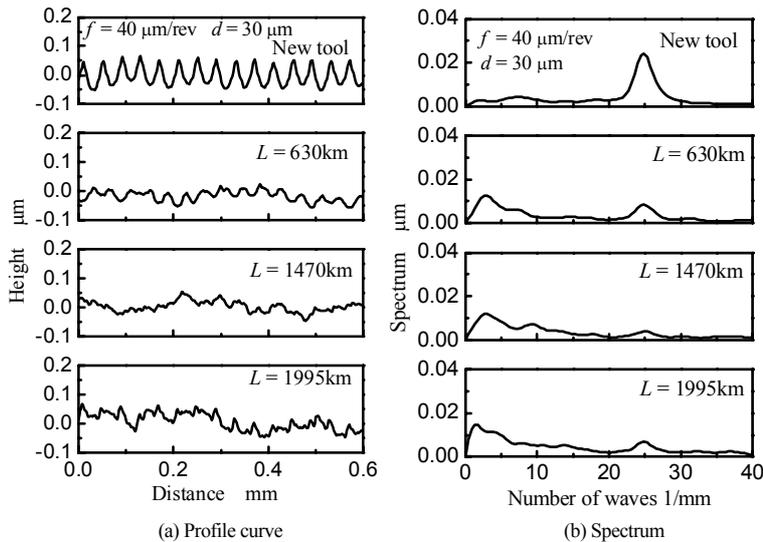


Fig. 14 Profile curve in feed direction and its spectrum with increase in cutting distance

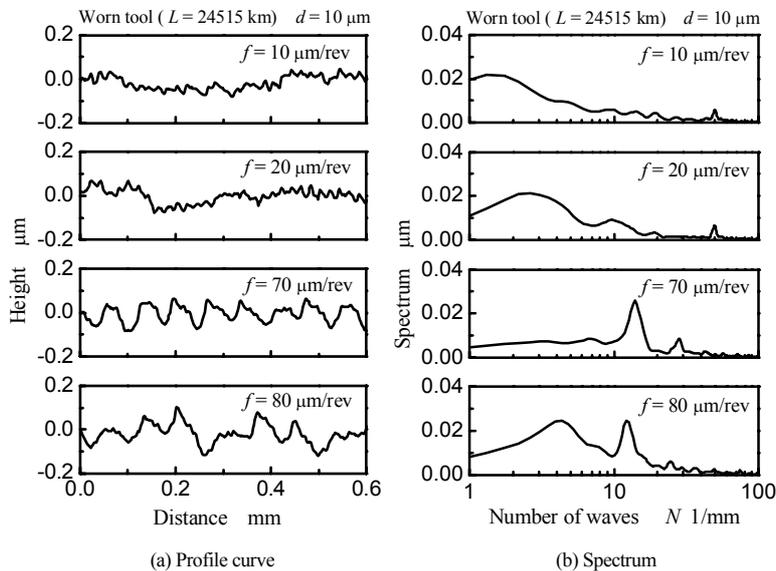


Fig. 17 Profile curve in feed direction and its spectrum with increase in feed rate

の、全体的傾向としてはほぼ一定になっている。この切削距離  $L$  に対する特性は、図 3 の▲印で示した工具送り方向の仕上げ面の粗さ  $PV_f$  とほぼ同じである。これは、切削距離  $L$  の増加に対し、工具送り方向の仕上げ面の粗さ  $PV_f$  はほぼ一定であったが、その粗さの生成要因は大きく変化していることを示している。

図 17 は、摩耗した工具（切削距離 2415 km）を使って得られた仕上げ面の工具送り方向の断面曲線とそのスペクトルで、工具送り量  $f$  をパラメータとして示してある。図 17(a) で示した工具送り量  $f$  が 10  $\mu\text{m}/\text{rev}$ 、20  $\mu\text{m}/\text{rev}$  での断面曲線には明確なカッターマークは見られず、仕上げ面の粗さの主な成分はうねりである。一方、工具送り量  $f$  が大きい 70  $\mu\text{m}/\text{rev}$ 、80  $\mu\text{m}/\text{rev}$  ではカッターマークが見られる。これらの工具送り量  $f$  の増加に対する断面曲線の特性の変化は、図 17(b) に示したスペクトルではより明確になっており、工具送り量  $f$  が 10  $\mu\text{m}/\text{rev}$ （波数は 100）、20  $\mu\text{m}/\text{rev}$ （波数は 50）でのスペクトルは、カッターマークに対応する波数でのピーク値は非常に小さいが、70  $\mu\text{m}/\text{rev}$ （波数は約 14.3）、80  $\mu\text{m}/\text{rev}$ （波数は 12.5）のスペクトルでは明確なピークが見られる。

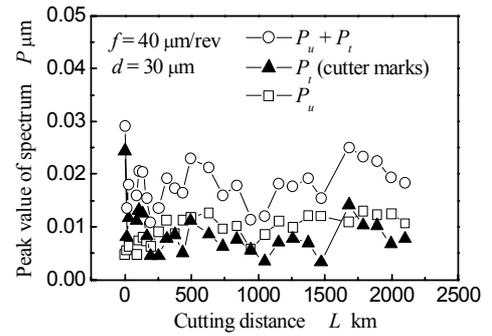


Fig. 15 Two peak values of spectrum and sum of them with increase in cutting distance

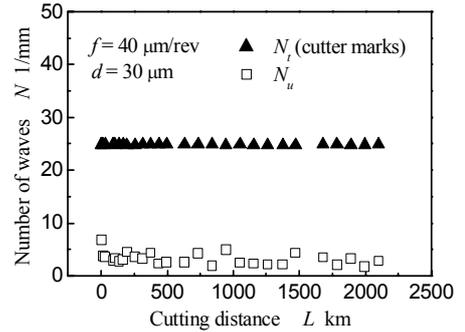


Fig. 16 Number of waves with increase in cutting distance

図 18 は、図 17(b) で示したスペクトルのピーク値であり、図 19 はピークでの波数である。ここで、図 18、19 で使われている記号等の定義は図 15、16 と同じである。図 18 の▲印で示されたカッターマークによるスペクトルのピーク値  $P_t$  は、断面曲線で見られたように、工具送り量  $f$  の増加に伴って大きくなっている。また図 19 の▲印で示したカッターマークの波数  $N_t$  は、理論粗さの導出で仮定される断面曲線の凹凸のピッチ（送り量）から予測されるように、 $f$  の増加に伴い急激に減少している。一方、うねり成分のピーク値は、 $f$  の増加に対して大きく増減しているが、全体的に増加あるいは減少するという一定の傾向は見られない。また図 19 の□印で示した波長の長いうねり成分の波数  $N_u$  は、 $f$  の増加に対し、やや増加する傾向は見られるが、その平均値は約 3 である。図 18 において○印で示したピーク値の和  $P_u + P_t$  は  $f$  の増加に対し徐々に増加している。このような特性は図 5(b) の▲印で示した  $PV_f$  の特性とほぼ一致しており、 $f$  の増加に伴って粗さを大きくしている主要な成分は、カッターマークによる成分と言える。

以上に示したように、工具逃げ面摩耗と工具送り方向の仕上げ面粗さとの関係では、工具摩耗に伴う切れ刃形状の転写性の劣化によりカッターマークの成分は小さくなるが、一方でうねり成分、つまり仕上げ面の加工硬化に起因する自励的な振動により生じるうねり成分は大きくなると考えられる。従って、以下ではこれらの二つの要因について、それぞれ考察することにする。

図 20 は工具送り方向の仕上げ面粗さ  $PV_f$  の内、波長の長いうねり成分  $PV_f P_u^*$  と工具逃げ面の摩耗幅  $w_{ff}^*$  との関係である。ここで、 $w_{ff}^*$  は、仕上げ面を創生する切れ刃部（図 11 の  $l_w = 0 \sim f$  の範囲）における逃げ面の摩耗幅の最大値（ $l_w = f$ ）で、図 20 に示した  $w_{ff}^*$  の実験式から求めた<sup>10)</sup>。また  $P_u^*$  はスペクトルのピーク値の和  $P_u + P_t$  に対する  $P_u$  の割合である。図 20 には、うねり成分  $PV_f P_u^*$

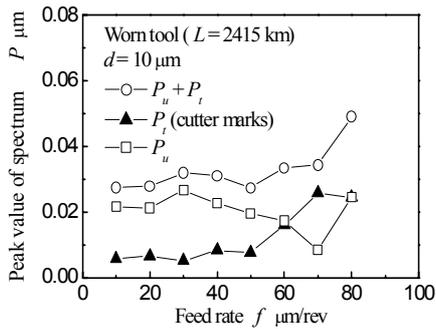


Fig. 18 Two peak values of spectrum and sum of them with increase in feed rate

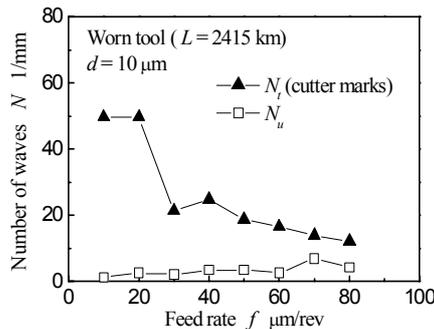


Fig. 19 Number of waves with increase in feed rate

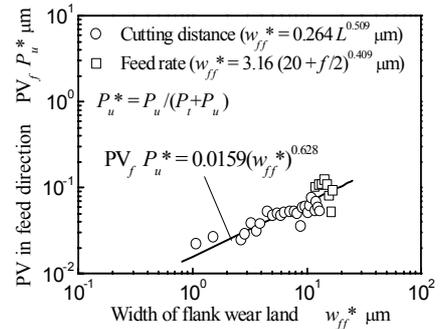


Fig. 20 Normalized roughness PV in feed direction caused by tool vibration with increase in flank wear land

が逃げ面の摩耗幅  $w_{ff}^*$  に対し、指数関数的に大きくなると仮定し、最小二乗法で求めた実験式の値が直線で示してある。得られた実験式の  $w_{ff}^*$  の指数の値 0.628 は、前報<sup>10)</sup>の切削方向の残留応力について得られた実験式の  $w_{ff}^*$  の指数 0.549 と同程度の値になった。これは、逃げ面の摩耗によって逃げ面の摩耗部と被削材との間に接触力が発生し、結果として仕上げ面には圧縮の残留応力が生じ、一方、工具には振動が生じて粗さが大きくなったことを示していると考えられる。

図 21 は工具送り方向の仕上げ面粗さ  $PV_f$  の内、カッターマークによる成分  $PV_f P_t^*$  と工具逃げ面の摩耗幅  $w_{ff}^*$  との関係である。ここで、 $P_t^*$  は断面曲線のスペクトルのピーク値の和  $P_u + P_t$  に対する  $P_t$  の割合であり、図では理論粗さ  $R_y$  で基準化して示してある。また図 21 に示した直線は、最小二乗法により求めた実験式の値で、その指数の値は -0.0621 になった。これは、切れ刃形状の転写性が工具逃げ面摩耗が比較的小さい段階で急激に低下し、カッターマークの成分は小さくなったことを示している。従って、図 17(a) の断面曲線、または図 17(b) のスペクトルで見られた、工具送り量  $f$  の増加に伴う理論粗さ成分の増加は、 $f$  の増加に伴い切れ刃の転写性が向上したためではなく、単に理論粗さが大きくなったためであると言える。また、工具送り量  $f$  が小さいところで  $PV_f P_t^*/R_y$  が大きくなったのは、 $f$  が小さくなると  $R_y$  が小さくなり、それに伴ってスペクトルのピーク値の推定誤差が増幅されたためと考えられる。

## 6. 結 言

ノーズ半径が 2 mm の単結晶ダイヤモンド工具を用いてアルミニウム合金の超精密切削加工を行い、工具の摩耗と仕上げ面の粗さとの関係を定量的に調べ、以下に示す結果を得た。

- (1) 仕上げ面の 3 次元粗さの PV 値は、切削方向と工具送り方向に測定した 2 次元粗さの PV 値の和と、ほぼ同じ大きさになった。これは、逃げ面摩耗により生じた切削方向の振動痕の工具送り方向への位相差が小さいためであると考察された。
- (2) 切削方向の 2 次元粗さにおいて、工具摩耗に伴い増加した主要成分の波長は、切削工具系の背分力方向の固有振動数での振動により仕上げ面に生じる振動痕の波長とほぼ同じであった。
- (3) 切削方向の 2 次元粗さの PV 値は、仕上げ面の硬さと同様、仕上げ面を創成する切れ刃部における逃げ面摩耗幅（最大値）にほぼ比例して大きくなった。
- (4) 上記(2), (3)より、工具摩耗に伴う切削方向の粗さは、工具逃げ面の摩耗に伴って仕上げ面が硬くなり、切削

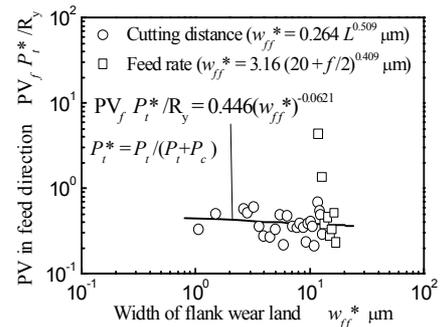


Fig. 21 Normalized roughness PV in feed direction caused by decrease of transferability of cutting edge profile with increase in flank wear land

工具系に背分力方向の自励的な振動が誘起され、大きくなったと推定された。

- (5) 工具送り方向の 2 次元粗さの主要成分は、切削工具系の振動に起因するものとカッターマークによるものであると推定された。
- (6) 理論粗さで基準化した工具送り方向のカッターマークによる成分は、逃げ面の摩耗幅の最大値に対し、指数関数的に減少した。

## 参 考 文 献

- 1) 橋本 洋：光学部品の超精密加工技術，精密工学会誌，**52**, 12 (1986) 2012.
- 2) 井川直哉，ほか 3 名：ダイヤモンド切削における粒界段差の生成要因，昭和 59 年精機学会秋季大会学術講演会論文集，**1** (1984) 71.
- 3) 安井平司，ほか 2 名：Al-Mg 合金を用いた超精密切削仕上げ面粗さの実験的解析，1995 年精密工学会秋季大会学術講演会論文集，**1** (1995) 51.
- 4) 中島利勝，ほか 3 名：Al-Mg 合金の超精密切削加工における仕上げ面粗さの創成要因に関する研究，精密工学会誌，**69**, 9 (2002) 1221.
- 5) 川久保洋一，ほか 3 名：磁気ディスク Al 基板加工用ダイヤモンドバイトの寿命について，昭和 57 年精機学会秋季大会学術講演会後援論文集，**2** (1982) 408.
- 6) 前田幸男，ほか 4 名：ダイヤモンド工具による Al 合金の鏡面切削に関する研究（第 2 報），精密工学会誌，**55**, 5 (1989) 847.
- 7) 吉田喜太郎，ほか 2 名：超精密金属鏡の加工技術の研究（R 刃ダイヤモンド工具による鏡面加工），日本機学会論文集，**C**, **51**, 471 (1985) 3121.
- 8) 菅野 健，ほか 3 名：Al 合金の鏡面加工について，日本機学会論文集，**C**, **53**, 485 (1987) 222.
- 9) 菅野 健，ほか 2 名：Al 合金の鏡面加工について（第 2 報，工具摩耗と表面性状），日本機学会論文集，**C**, **57**, 536 (1991) 1346.
- 10) 近藤英二，ほか 3 名：超精密切削加工された Al 合金の仕上げ面性状に及ぼす影響（第 1 報）—単結晶ダイヤモンド R 刃バイトの切れ刃の摩耗が加工硬化層と残留応力に及ぼす影響—，精密工学会誌，（投稿中）。
- 11) 高巢周平，ほか 2 名：鏡面切削における定常微小振動の切削面粗さへの影響，精密工学会誌，**53**, 5 (1987) 782.

