鏡面切削における定常微小振動の 切削面粗さへの影響*

高 巢 周 平** 梶 田 正 美** 西 口 隆**

Influence of Steady Vibration with Small Amplitude upon Surface Roughness
in Diamond Machining

Shuhei TAKASU, Masami MASUDA and Takashi NISHIGUCHI

Steady vibrations with small amplitude and low frequency usually remain in precision diamond machine tools even supported on air mounts, and inevitably deteriorate cut surfaces roughness. Analysing an enveloping curve of feed marks disturbed by such a steady vibration, the surface roughness is estimated as the function of both the ratio of vibration amplitude to theoretical roughness, and the phase lag of the vibration to work rotation. This makes it clear that the roughness can be reduced to 20-30% of the sum of the theoretical roughness and a vibration amplitude at optimal cutting conditions. The analytical results are proved in experiments cutting Al alloy with straight and round tools. The lathe used for the experiment was oscillated at 5.8 Hz frequency, 0.03 $\mu\text{m}_{\text{P-P}}$ relative amplitude between a tool and a workpiece, by the disturbance from the floor. These results show that straight tools are more effective for improving surface roughness than round ones, and provide a surface roughness within 0.01 $\mu\text{mR}_{\text{max}}$ during the above-mentioned vibration.

Key words: diamond machining, surface roughness, vibration

1. 緒 言

単結晶ダイヤモンド工具を用いて軟質金属を鏡面切削する場合、工具と工作物間に微小振動が存在すると、面粗さが害される。無振動加工が理想であるが、経済的および技術的理由から、生産ラインでの実現は困難である。単刃工具による切削における面粗さへの振動の影響については、通常の旋削加工条件での仕上面形状を統計的に解析し振動振幅との相関を見た報告^{1)~3)}があり、この中では面粗さは振動の全振幅と工具形状と送りから決定される幾何学的な理論面粗さの和にほぼ等しいデータが示されている。この結果は超精密切削加工においては必ずしも一致せず、実際の超精密加工実験によれば、切削面粗さは上記とよりかなり良くなる現象が見られた。

Shi ら⁴⁾はびびり振動で振動振幅が大きくなったとき1回転後から数回転後の工具が最初に形成された切削方向のうねりを削りとることを報告している。

本報告では、定常単弦振動が存在する場合の工具送

り方向の面粗さを運動学的な解析、さらに平バイトおよびRバイトを用いたAlの切削実験により面粗さを向上させるための最適切削条件について検討を行った。

2. 相対振動の切削面粗さへの影響

振動に起因するうねりは、切削方向だけでなく、工具送り方向にも形成される。一般に工具送り方向に波長の短いうねりが形成され、面粗さの最大値が現れるので、ここではこの方向の面粗さの検討を行った。

なお、解析に当たっては、①工具は工作物に対し切込み方向のみに相対的に定常振動している、②工作物の工具が通過した断面は完全に削除され、ばりやむしりは発生しない、と仮定している。

図1に振動を伴った正面旋削における加工面へのうねり成形状態を示す。振動の周波数 f (Hz) と工具回転数 n (rps) には

$$\frac{f}{n} = m + a \quad (1)$$

の関係がある。ここで m は0又は正の整数、 a は小数点以下の端数 ($-0.5 < a \leq 0.5$) である。

工作物1回転ごとの振動の位相差 ϕ は以下の式で

* 原稿受付 昭和61年4月2日、昭和59年度精機学会春季大会学術講演会(昭和59年3月25日)にて発表

** 正 会 員 (株)日立製作所(横浜市戸塚区吉田町292)

Fig. 1 Waves induced by relative vibration between tool and workpiece

Fig. 2 Interference in the wave of relative vibration

与えられる.

$$\phi = 2\pi a \quad (2)$$

いま、図2に示すように、工具が最も工作物に切り込んだ点を原点とし、工具送り方向に x 軸、切込みと逆方向に y 軸をとる。この xy 面内で工作物1回転当たりの工具送り量 s ごとに離散的に存在する工具先端 $P_0, P_1, P_2, \dots$ を通る工具送り方向の運動軌跡(以下、工具先端軌跡と呼ぶ)は

$$y = A \left\{ 1 - \cos \left(\frac{x}{s} \cdot \phi \right) \right\} \quad (3)$$

となる。ここで A は振動の片振幅である。

2.1 平バイトにおける工具干渉

前切れ刃が直線である平バイトを用いて鏡面切削を行う場合、送り方向に対する前切れ刃の傾き角、すなわち前切れ刃角 η は、理論面粗さの決定要因の一つであり、前切れ刃角が小さいほど、理論面粗さも小さくなるため、極めて小さい値に設定される。したがって、図2に示すように前切れ刃角が小さく、相対振動がある場合の工具先端軌跡を前切れ刃が横切るような位置 P_0 に工具先端が来たとき、同図のハッチング部分が削りとられるので、この切れ刃より上方にある工具先端軌跡上の点、たとえば P_1, P_2 に工具先端が来たときの工具は切削面粗さの形成に関与せず、工具先端が P_0 にある工具の前切れ刃と、この前切れ刃より下方の工具先端軌跡上の点 P_3 に工具先端が来た工具により切削面粗さが決定される。この現象を、工具前切れ刃が

Fig. 3 Critical cutting edge angle of interference

Fig. 4 Interference zone of straight tool during relative vibration

工具先端軌跡を横切り干渉していることから、ここでは“工具干渉”と呼ぶことにする。すなわち工具先端軌跡の最高点 Q_c より原点側に工具先端のある工具の前切れ刃が、この点 Q_c より後方の工具先端軌跡と交わるとき工具干渉が生ずる。

前切れ刃角 η が小さいほど工具干渉が起きやすいが、ある角度以上では、工具先端の位置にかかわらず工具干渉が発生しない。この限界の前切れ刃角は、図3において工具先端軌跡の最高点 Q_c を通り、工具先端軌跡と接する直線の傾き角に等しい。

この干渉限界となる臨界の前切れ刃角 η_c は

$$\eta_c \cong 0.725 A |\phi| / s \quad (4)$$

で与えられる。前切れ刃角 η がこの臨界前切れ刃角 η_c より小さいとき工具干渉が生じる。上式を理論面粗さ $R_{tn} \cong \eta \cdot s$ (鏡面切削では横切れ刃 γ は $\gamma \gg \eta$ であるため、横切れ刃角の理論面粗さへの影響は無視できる) を用いて書き直すと工具干渉条件は、

$$|\phi| \cdot \frac{A}{R_{tn}} \geq 1.38 \quad (\text{rad}) \quad (5)$$

となる。図4に干渉を生ずる限界値を示すが、この図より、 A/R_{tn} が大きくなると、干渉する ϕ の領域が広がるが、 A/R_{tn} が0.44以下では位相差 ϕ の値にかかわらず工具干渉は生じないことがわかる。

Fig. 5 Surface profile with straight tool

2.2 平バイトにおける切削面粗さ

面粗さは工具軌跡に干渉している工具と、この工具の次に面粗さの形成に關する工具の位置により決定され、これらの工具の位置關係によりある範囲内で面粗さが變化する。この面粗さの範囲の最大値および最小値を次に求める。

図5(a)は最小面粗さを与える工具位置關係を示したもので、工具先端軌跡上の点Pにある工具の前切れ刃とこの点Pで工具先端軌跡に接する接線が一致し、この前切れ刃とQ₁にある工具の横切れ刃との交点T₁のx軸からの高さをH₁、Q₁にある工具の前切れ刃と、Q₂にある工具の横切れ刃との交点T₂の高さをH₂とすると面粗さの最小値R_{sm}はH₁=H₂の時に得られ、

$$R_{sm} = H_1 = R_{th} + A \left\{ 1 - \cos \left(\frac{x_1}{s} \cdot \phi \right) \right\} \quad (6)$$

となる。ここで、x₁はQ₁への原点から測ったx軸方向の距離で、Pの原点からの距離をx₀とすると、

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= \sin^{-1} \left(\frac{R_{th}}{A \cdot \phi} \right) \cdot \frac{s}{\phi} \\ x_1 &= \frac{A}{R_{th}} \cdot \left\{ \cos \left(\frac{x_0}{s} \cdot \phi \right) - \cos \left(\frac{x_1}{s} \cdot \phi \right) \right\} \cdot s \\ &\quad + x_0 + s \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

を満足する。

図5(b)は面粗さが最大になる工具位置を示したもので、P₁にある工具前切れ刃が1回転後の工具先端位置P₂を通り工具先端軌跡と点Qで交わる。この点Qに工具先端が一致する工具前切れ刃と1回転後の工具横切れ刃との交点T₂'の高さH₂'により面粗さの最大値が与えられ、

$$R_{smax} = H_2' = R_{th} + A \left\{ 1 - \cos \left(\frac{x_1'}{s} \cdot \phi \right) \right\} \quad (8)$$

Fig. 6 Interference of round tool during relative vibration

となる。ここでx₁'は原点からQ点へ測ったx軸方向の距離でx₀'をP₁点への原点からの距離とすると

$$\left. \begin{aligned} x_0' &= \left\{ \frac{1}{\phi} \sin^{-1} \left\{ \frac{R_{th}}{2A} \operatorname{cosec} \left(\frac{\phi}{2} \right) \right\} - \frac{1}{2} \right\} s \\ x_1' &= \frac{A}{R_{th}} \left\{ \cos \left(\frac{x_0'}{s} \cdot \phi \right) - \cos \left(\frac{x_1'}{s} \cdot \phi \right) \right\} s + x_0' \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

を満足する。

2.3 Rバイトにおける工具干渉条件

Rバイトを用いた場合の工具干渉条件は平バイトと同様の考え方により求めることができる。Rバイトの工具先端が原点にあるとき、工具切れ刃は

$$y = x^2 / 2r \quad (10)$$

によって近似的に表すことができる。ここでrはRバイトのノーズ半径である。

工具先端軌跡は図6に示すように、x=πs/φに最高点Q_cがあり、工具切れ刃とx=πs/φで示される直線との交点Q₀がこのQ_cより下方に存在するとき工具が干渉するから

$$A \left\{ 1 - \cos \left(\frac{x_i}{s} \cdot \phi \right) \right\} + \left(\frac{\pi s - x_i}{2} \right)^2 / 2r \leq 2A \quad (11)$$

より干渉条件

$$\phi^2 \frac{A}{R_{th}} \geq 8 \quad (12)$$

が導かれる。

工具干渉域を図7に示す。この図よりA/R_{th}が0.81より小さければ位相差φによらず工具干渉は生じない。また図4に示す直刃バイトの干渉域に比較してRバイトの場合φが大きい側へ干渉域がずれており、平バイトの方がRバイトより干渉を生じやすいことがわかる。

2.4 Rバイトにおける面粗さ

図6において点Q₀のx軸からの高さは次式によって与えられる。

$$y = A \left\{ 1 - \cos \left(\frac{x}{s} \cdot \phi \right) \right\} + \left(\frac{\pi s - x}{2} \right)^2 / 2r \quad (13)$$

工具軌跡はx=πs/φに対して対称であるから、上式の

Fig. 7 Interference zone of round tool during relative vibration

最小値が最小面粗さを与える。この最小面粗さを与える工具位置 P の原点からの距離を x_1 とすると、 $\partial y / \partial x = 0$ より

$$x_1 = \frac{A}{8R_{th}} \sin\left(\frac{x_1}{s} \cdot \phi\right) \cdot s \quad (14)$$

これを満足する $x = x_1$ を式 (13) に代入して最小面粗さ R_{min} が求まる。

面粗さの最大値は解析的に求めることが困難なので、ここでは数値解を求めた。面粗さ形状は工具軌跡上に工具送り量 s の間隔で離散的に存在する工具パターンの包絡線により与えられる。数値計算は、その工具パターンが面粗さの形成に関与する可能性のある最先端の工具位置 P_1 ($x = -\alpha_c s$) から始められる。この点 P_1 はこの点に工具先端のある工具の切れ刃が後続の工具先端 P_2 ($x = (1 - \alpha_c)s$) で工具軌跡と交わる点であり、この位置を示す α_c は

$$\alpha_c = \frac{1}{2} - \frac{1}{\phi} \sin^{-1} \left\{ \frac{R_{th}}{2A} \operatorname{cosec} \left(\frac{\phi}{2} \right) \right\} \quad (15)$$

となる。

この点から数えて i 番目と j 番目の工具切れ刃の交点 T_{ij} の高さ H_{ij} は

$$H_{ij} = A \left[1 - \cos \{ (i + \alpha) \phi \} \right] + 4R_{th} \left\{ \frac{x_{ij}}{s} - (i + \alpha) \right\}^2 \quad (16)$$

ここで x_{ij} は原点からのその交点 T_{ij} への x 軸方向の距離で

$$x_{ij} = \left[\frac{A}{8R_{th}} \cdot \frac{\cos \{ (i + \alpha) \phi \} - \cos \{ (j + \alpha) \phi \}}{(j - i)} + \frac{i + j}{2} + \alpha \right] s \quad (17)$$

となる。

ある α における式 (16) の整数 i, j をそれぞれ ($0 \leq i \leq \pi / \phi + \alpha$), ($\pi / \phi \leq j \leq 2\pi / \phi + \alpha$) の範囲で変化させたときの H_{ij} の最小値が面粗さ R_{ij} を与え、この R_{ij} の $-a_c \leq \alpha \leq 1 - a_c$ の範囲における最大値が面粗さの最大値を与える。図 8 (a) に式 (6), (8), 図 8 (b) に式 (13), (16) の計算結果を示す。これらの図より、

- (1) 振動の影響を考慮した面粗さは位相差 ϕ と A/R_{th} の関数として表すことができる。
 - (2) 面粗さを最小とする最適位相差が存在する。
 - (3) 同一理論面粗さを得る条件では R バイトの方が平バイトより振動の影響を受けやすい (面粗さが悪くなる)。
- ことがわかる。

(a) Relationship between surface roughness and relative vibration with straight tool

(b) Relationship between surface roughness and relative vibration with round tool

Fig. 8

Fig. 9 Precision diamond lathe for experiments

Table 1 Cutting conditions

Experiment	Tool shape effect	Phase effect
Cutting Method	Fly-cutting	
Tool off-set from spindle center	95 mm	
Spindle speed (Cutting speed)	$n=24$ rps ($V=860$ m/min)	$n=8.7, 16.7, 24$ rps ($V=300, 600, 840$ m/min)
Cutting depth	5 μm	
Feed rate	7.5, 15, 30 $\mu\text{m}/\text{rev}$	6.5, 13, 20 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Single crystal diamond tool	Straight tool $l=0.88$ mm Round tool $r=6.3$ mm	— $r=6.3, 14$ mm
	rake angle 0° , relief angle 3°	
Workpiece	Al-Mg alloy, 10×20 mm	
Surface roughness measurement	Talystep	

3. 実験装置および方法

図9は実験に用いた精密加工機を示す。空気軸受主軸の回転精度は $0.03 \mu\text{m TiR}$ 以下で、油静圧しゅう動テーブルのヨーイング誤差は $0.025 \mu\text{m}/100$ mm以内である。ベッドはグラナイト製で4個のエアマウントにより支持され、2 Hzの垂直方向の固有振動数を持っている。

切削条件を表1に示す。工作物としてAl合金を用いたが、これは切削抵抗が小さくびびりが生じにくく、また工具摩耗を無視でき、干渉現象が顕著に現れることによる。

実験方法としてフライカット加工を用いたが、これは切削速度が一定であること、工具径に比べ小寸法の工作物を送り方向に直角に切削する場合上記解析手法が適用できることによる。

工具として、単結晶ダイヤモンドの直線状の切れ刃の平バイトと円弧状の切れ刃のRバイトを用いた。実際の工具形状及び前切れ刃角は鏡面仕上した面に工具

Fig. 10 Shapes of diamond tool

を数 μm 切り込んで得られた溝形状を触針式の面粗さ計により測定して求めた。図10に平バイトとRバイトの測定例を示す。

図11に工具と工作物の相対振動を示すが、これは静電容量型変位計を用いて無負荷運転中の主軸中心と工作物テーブル間の相対変位を測定している。この図において2つの顕著な振動モードが見られる。1つは周波数2.2 Hzの実験機の垂直方向の固有振動数にほぼ等しいものと、他の1つは外乱振動の主成分である周波数5.8 Hzの振動モードである。

複数の振動の面粗さへの影響は上記と同様の考えにより評価できるが、計算が複雑になるため、ここでは図11に示す測定データでの最大振幅において支配的な5.8 Hz、 $0.03 \mu\text{m}_{\text{P-P}}$ の単

Fig. 11 Spectrum of relative vibration between the tool and the workpiece

Fig. 12 Profiles of machined surface affected by feed rate and end cutting edge angle

一な定常振動が存在するとして計算を行い実験値と比較した。

4. 実験結果

4.1 バイト形状の影響

図12に平バイトとRバイトにより切削したときの面粗さ形状を示す。主軸回転数は24 rpsで振動の周波数は5.8 Hzであるから式(1), (2)より位相差は $\phi = 87^\circ$ となる。

切削条件は同図(a)が図4に示す工具干渉の臨界曲線上、同図(d), (e)は干渉域内にある。

同図(a), (d)より面粗さ形状は送りマークと振動のうねりにより形成され、うねりの波長は送りマークの4~5倍となっている。これは式(3)から計算される値と一致する。理論面粗さがほぼ等しい切削条件の場合、平バイトの方がRバイトよりも良好な面粗さが得られている。平バイトの場合、理論面粗さの減少によってうねり振幅値も減少する。このことは図8の結果と一致する。図13はこれらの実験結果と面粗さの計算結果を示したもので両者の間には良い対応が見られる。

実験値は理論計算における最大値と

Fig. 13 Surface roughness effected by relative vibration

最小値の間にあるはずであるが、最小値より小さい。これは振動の最大振幅値を解析に用いたことによると考えられる。

この実験において平バイトを用いた場合、最も理論面粗さの良い条件で全振幅 $0.03 \mu\text{m}_{P-P}$ の振動下で $0.01 \mu\text{m}_{R_{\max}}$ 以下の面粗さを得ている。

4.2 位相差の効果

次にノーズ半径が6.3 mmと14 mmのRバイトを用いて位相差の面粗さへ及ぼす効果について実験を行った。Rバイトは平バイトより振動の面粗さへの影響が大きく、適当に条件を選べば($A/R_{th}=3$ とした)

Fig. 14 The effect of phase shift upon surface roughness with relative vibration

位相差の影響が顕著に現れる。また振動状態の影響も調べるため実験機を別の基礎上へ移設している。このときの振動状態は周波数 4.8 Hz, 全振幅 $0.02 \mu\text{m}_{\text{P-P}}$ であった (図 14 (a))。

実験結果と式 (13), (16) の計算結果を図 14 (b) に示す。この図より、位相差が大きくなるほど面粗さは良好になり、またうねりの波長も短くなって実験結果と計算結果が良い対応を示すことがわかる。また、ノーズ半径の差による面粗さの差はほとんど認められない。

5. 結 言

超精密加工における微小振幅の単弦振動の面粗さへの影響について解析及び実験を行い、次の結果を得た。

- (1) 工具干渉により面粗さを良好にでき、最適な位相差において面粗さは相対振動の全振幅及び幾何学的な理論面粗さの和の 20~30% にまで減らす

ことができる。

- (2) パバイトは R パイトより工具干渉を生じやすく、相対振動が存在する場合の面粗さの向上にすぐれている。
- (3) 全振幅 $0.03 \mu\text{m}_{\text{P-P}}$ の相対振動の存在下でも最適位相差において $0.01 \mu\text{m}_{\text{Rmax}}$ 以下の面粗さを得ている。

参 考 文 献

- 1) 佐田登志夫ほか：切削加工における振動と表面あらさへの関連、工作機械の剛性および切削性能の向上に関する研究分科会研究成果報告、日本機械学会 (1974) 225。
- 2) 佐藤壽芳ほか：工具・被削材間の相対変位と表面粗さの関連に関する基礎実験、生産研究, 27, 7 (1975) 12。
- 3) K. Mitsui and H. Sato: Frequency Characteristic of Cutting Process Identified by an In-process Measurement of Surface Roughness, Ann. CIRP, 27, 1, (1978) 67。
- 4) H.M. Shi and S.A. Tobias: Theory of Finite Amplitude Machine Tool Instability, MTDR, 24, 1, (1984) 45。

(p. 775 より続く)

〔極限材料製造システム〕 近年における固体材料技術、特に高純度化技術、薄膜技術の進歩は著しく、これまでの極限環境利用による極限状態科学から材料合成における新しい時代、つまり極限材料設計の時代が到来している。ところが、材料合成の最も基本的な部分である物質合成の素過程、反応を制御する方法には現在まで有効な手段がなかった。

そこで昨年度は「ファインセラミックスの部品・素形材のための一貫融合システム」について調査研究を行った。今年度はその具体化として極限材料製造システムを提案したい。またこのシステムを実現する上でのキーポイントである原材料技術について検討している。

まず同システムのハードウェア構成は、①原料合成装置、②パターン形成装置、③焼成装置、④材料評価装置、⑤計測・制御用コンピュータ、⑥データベース用コンピュータからなる。この中の原料合成装置では、金属アルコキシドを利用する原料合成プロセスを提起する。

多くの高度なエレクトロニクス製品を製造するシステムは、そのシステムの直接的な部分として化学的な物質合成システムを含んでいることはない。

それはいわゆる化学プラントでは作業環境を悪くするような腐食ガスなどが発生するので、非常にクリーン度を要求されるエレクトロニクスプラントとは両立しない

ためである。

しかし、金属アルコキシドを利用する原料合成プロセスでは、出発原料物質は金属アルコキシド、アルコール、水であり、エレクトロニクス工業の作業環境と両立が可能である。特に従来のセラミックス原料プロセスで必要とされていたような高温反応炉、粉碎、混合機などを必要としない純粋に化学的な原料合成プロセスを実現できる。

同システムを実現するためにはスラリーやゾルなどの形態に流体化された原料が不可欠ことから、金属アルコキシドを利用する化学的方法によってチタン酸バリウム・セラミックス用原料を流体化する方法と、それを利用したチタン酸バリウム・マイクロ球の製造について検討している。

金属アルコキシドを利用するセラミックス原料技術は、マイクロおよびナノレベルでの組成と構造の制御性に対する汎用性を持ち、またコンピュータ制御されたセラミックスのための極限材料製造システムを構築可能である。このようなコンピュータ制御システムは汎用のデータベース構築用ハードウェアとして利用することもでき、このデータベースと他のセラミックスデータを組み合わせることで、同システムをインテリジェント化することも可能である。(服部 敏夫)