超音波振動切削に関する研究（第2報）*

—背分力方向振動切削による基礎円筒形状・理論表面粗さの解析と
送り・切れ刃振動方向を変化させたときの表面粗さと真円度の考察—

早 乙 女 辰 男** 佐 藤 啓 仁***

Study on Ultrasonic Vibration Cutting (2nd Report)

— Analysis and Consideration of Cylindrical Profile and Surface Roughness by Vibration Cutting on Thrust Force Direction —

Tatsuo SOUTOME and Keijin SATO

The final objective of this investigation is an invention of theory and technics for multiple precision cylindrical machining with combining ultrasonic vibration cutting on thrust force direction, and superposition superfinishing process. This finishing process is a high efficient mirror machining providing (20-50Hz) low frequent vibration and ultrasonic vibration above 20 kHz to fine abrasive stone. In this report, it is analyzed that high precision cylindrical machining as being basic profile can be achieved by vibration cutting on thrust force direction, and that theoretical surface roughness should be formed around this basic cylinder. Cutting phenomenon are observed by some experiments. In the results, it is confirmed that chips on low feed rate and high cutting speed conditions have been cut to pieces as same as analyzing, and that roundness of $1.0\mu\text{m}$ being near equal to main spindle accuracy and surface roughness of $2.5\mu\text{mRz}$ for theoretical surface roughness $3.4\mu\text{m}$ are obtained by vibration turning in the case of aluminum alloy. Main cutting conditions are as follows : cutting speed ; $v=280\sim 298\text{m/min}$, feed rate ; $S=2\sim 50\mu\text{m/rev}$, depth of cut ; $t=50\mu\text{m}$, work material; carbon steel, aluminum alloy, brass, tool frequency; $f=21.9\text{kHz}$, amplitude ; $a=9\mu\text{m}$, cutting tool material and profile ; carbide K10, ($0^\circ, 0^\circ, 6^\circ, 25^\circ, 2\sim 40^\circ, 2\sim 40^\circ, 0\text{mm}$). This report indicates that ultrasonic vibration cutting on thrust force direction can be possibly used for multiple precision cylindrical machining.

Key words : ultrasonic vibration cutting, superposition superfinishing, multiple precision cylindrical machining, roundness, surface roughness, thrust force direction, profile of chips.

1. 緒 言

本研究着手の直接的動機は金属短繊維製造を目的とし、超音波振動を利用した切りくず寸断法を考案することにあつた。これまで切りくず寸断を目的とした研究に関しては幾つか貴重な報告^{1)~9)}がなされているが、いずれも可聴波域の振動を利用した研究であり著者らが対象とする 20kHz 以上の超音波振動を利用した研究は見当たらないように思われる。

本振動切削方法では背分力方向の振動成分を有する振動切削を広く捉えて背分力方向振動切削と呼称することにした。背分力方向振動切削は一般にあまり利用されていないが精密穴加工や精密研削など加工対象によっては切削抵抗を軽減し加工精度を向上させるなどの振動切削効果が報告されている^{9)~13)}。

本研究着手当初¹⁴⁾に観察した切りくず寸断現象は切削時の切削力波形が規則的かつ断続的であることを連想させた。これにより本研究では切削時の工作物挙動を静的微小変位のみとする不感振動切削機構¹⁵⁾が適用されて理想的基礎真円（振動切れ刃各振動サイクルの最大切込み点を結んで得られる基礎円形状）が得られ、さらに背分力方向振動切削によって表面粗さが大きくなる欠点を改善できれば高精度円筒加工として利用できることを着想した。すなわち背分力方向振動旋削の後に重畳超仕上げ¹⁶⁾¹⁷⁾を行って鏡面仕上げする複合加工方法を考えた。

著者らの一人は別途報告において隈部と共に能率的鏡面仕上げ方法として重畳超仕上げ方法を創案し、すでにこの仕上げ方法に主分力方向振動切削を前加工として複合させることで超精密円筒加工できることを報告している¹⁸⁾。この結果から本研究でもこの複合加工方法に習って背分力方向振動切削を利用した複合精密円筒加工の可能性を究明することにした。

第1報¹⁹⁾ではその究明の第一歩として背分力方向振動切削機構の解析と実験を行って、概略解析通り切りくずが生成されることと、この時に発生するパルス状の切削力を工作物に作用させることで高精度の基礎円が得られることを示した。

工具刃先を送り方向に振動させた場合の機構解析はすでに B.A.Woody らによって詳細なコンピュータ解析と実験の考察がなされている⁷⁾。本報告では複合加工を前提とする立場から背分力方向振動切削を利用した高精度基礎円筒形状の創生方法の検討を行った。そしてさらに後工程である重畳超仕上げにおける適正な条件を設定することも意図し、普通切削による場合と対比できる理論表面粗さを従来の表面粗さの理論式を利用して求めることにした。実験はまず円筒外周振動旋削における切りくず形状の観察を行って切りくず寸断現象を確認し、次に表面粗さとそれに関連して真円度を考察することにした。

その結果、本報告では高速切削速度、低速微小送り条件において理論表面粗さに近い比較的均一な加工表面と主軸回転中心の振れに近い真円度が得られ、最終目的とする複合精密円筒加工の前加工として利用できる結果を得たので報告する。

* 原稿受付 平成 25 年 6 月 14 日

** 正 会 員 （株）パレットコーポレーション（東京都中央区京橋 2-6-21）

*** 宇都宮大学工学部（栃木県宇都宮市陽東 7-1-2）

2. 背分力方向振動切削による高精度基礎円筒形状の創生と表面性状の解析

2.1 背分力方向振動切削による高精度基礎円筒形状の創生
工具に規則的な振動を与えながら、断続的に切削する方法が振動切削法であり、図1に示すように工具の振動方向別に(a)

Fig.1 Vibration direction of cutting tool

Fig.2 Vibration cutting mechanism on thrust force direction

(a) Conventional cutting

(b) Vibration cutting

Fig.3 Tool-work vibration system

主分力方向振動切削, (b)背分力方向振動切削, (c)送り分力方向振動切削がある. 更に工具に二方向の振動を同時に与えた楕円振動切削²⁰⁾もある. 一方向のみの振動切削を対象に高精度加工への適正を考えると, 本来(a)の主分力方向振動切削が本質的切削方法である. 主分力方向振動切削を実用する際に加工精度の向上や切削抵抗の減少, および工具摩耗や切削ばりを低減させるなどの振動切削効果を発揮させるためには $v < 2\pi a f^{21)}$ (v : 切削速度, a : 工具の振動振幅, f : 工具の振動数)の条件を満たす必要がある. $v \geq 2\pi a f$ の高速振動切削条件において工作物挙動の安定化を示したシミュレーション解析結果²²⁾を得てはいるが実用には至っていない. 本研究では切りくずを寸断し, かつ断続的切削を行なう方法として背分力方向の振動切削を考え, 高速振動切削の可能性と, さらにこれを利用した高精度複合円筒加工の可能性を検討することにした.

背分力方向振動切削機構とそれによって生じる切削力波形を図2に示す. 刃先の運動軌跡は正確には正弦波運動軌跡であるが簡略化して三角波形によって表している. 前報¹⁹⁾で示したように, 解析では工具の振動方向を送り方向に対し γ 傾斜させた場合を考え, 送り方向の工具振幅として $a_\gamma (= a \cos \gamma)$ を用いた. 図2には工具振幅 $2a_\gamma \geq$ 工具の送り S , 切れ刃逃げ角 $\alpha \geq$ 切れ刃運動角 θ の条件で前回切削の運動軌跡 $A_1-B_1-C_1 \dots$ と今回切削の運動軌跡 $A_2-B_2-C_2 \dots$ において振動切れ刃前進時の軌跡が一致する位相角 $\varphi = (\pi S / 2a_\gamma)$ の場合を示した¹⁹⁾. この $\varphi = (\pi S / 2a_\gamma)$ におけるモデル化された切削機構図は高速切削速度, 微小送り条件においておおよそ背分力方向振動切削機構を表し得ることを前報における解析と実験によって示した. 図2の切削機構図からわかるように, A_1-B_2 , C_1-D_2 , $\dots$ 区間においては工具切れ刃が t_{ct} 時間工作物に食い込んで a , b , c , $\dots$ の切りくずを生成し, B_2-C_1 , D_2-E_1 , $\dots$ においては切込みがゼロとなって切りくずは生成されない. この時, 送り方向には順次①, ②, ③ $\dots$ の切りくずが生成される. このように規則的な断続的切削力 P_t が連続して作用する機構を示す. この切削力波形が工具-工作物振動系に作用した場合の工作物挙動とそれによって得られる円筒形状精度について普通切削の場合と比較しながら解析する.

図3(a)に普通切削における工具-工作物振動系を示し, (b)図に背分力方向振動切削における工具-工作物振動系を示す.

Fig.4 Geometrical surface roughness on vibration cutting

(a) 図の普通切削において工具、工作物は切削時に発生する不規則な切削抵抗によって大きく振れ動き、その結果工作物外周は図に示すような不規則な真円度波形を示すことになる²³⁾。そしてさらに工具刃先を送り方向（小作物回転中心軸方向）に移動させることでこの不規則な真円度波形が軸方向に連続して創生されて円筒面が形成される。このとき工作物軸方向断面外周部に残される各切削溝の谷部（刃先の切込み点）も真円度同様不規則な切込み深さを示すため、切削加工後の表面の凹凸を除去し、おおよそ切削溝谷部を連結した円筒面（基礎円筒基準面）を得たとしても、図中太線で示すような真円度と真直度の悪い円筒面が創生されることになる。本報告では後述する (b) 図の振動切削の場合における強制振動する刃先の最大切込み点を結んで得られる円筒形状を基礎円筒基準面と呼称することにしたが、(a) 図中に示した太線の円筒面も便宜的に普通切削における基礎円筒基準面と呼称することにした。普通切削における前述の現象を改善するためには切削時の工作物挙動を安定させ、その変位を小さくするために高速切削が必要となり、工作機械各機械要素の剛性と精度を高めるなどしてかなり大がかりな対策が必要となる²⁴⁾。

次に、(b) 図に示す背分力方向振動切削における工具—工作物振動系を考える。図2に示したパルス状の切削力 $P_t(t)$ が (b) 図に示す工具—工作物振動系に作用したとき、 $\omega/\omega_n \gg 1$ の条件を満たす場合（ ω ：工具の角振動数、 ω_n ：工作物の角固有振動数）、工作物変位は $x = (t_{ct} \cdot P_{tt}) / (T \cdot k_w)$ の静的変位成分のみで表され¹⁵⁾、高速普通切削時における理想化された切削力 $P_t(t) = P_{tt} \text{mean} + p_{tt} \sin \omega t$ が作用した場合の工作物変位 $x = P_{tt}/k_w$ ²⁴⁾ に比較し、さらに t_{ct}/T 倍小さな工作物変位を示す。ここで T ：工具の振動周期、 k_w ：工作物のバネ定数、 t_{ct} ：振動切れ刃1サイクル中の正味切削時間を示す。

このように本報告での高速背分力方向振動切削モデルにおいて不感性振動切削効果が発揮されて、工作物挙動を静止化できるため、図3 (b) に示す振動数 f 、振幅 a で振動する切れ刃により v/f の等ピッチで工作物表面に描かれる最大切込み点 1, 2, 3, ... を結んで得られる基礎円筒形状は真円に近い形状を示す。さらに切れ刃を主軸回転中心軸と平行に移動させることで高真直度を有した基礎円筒形状が創生できるものと考えられる。このとき得られる表面粗さ R_z はこの基礎円筒面を底部として円筒外周全面に重畳しているものであり、この重畳された粗さ成分を、基礎円筒形状を崩さずに除去することが出来れば高精度円筒加工ができるものと考えられる。この除去方法に重畳超仕上げによる能率的鏡面仕上げ方法が考えられる。すなわち鏡面仕上げに適した微細砥粒砥石を用い、切削加工工程においては砥石に低周波振動と超音波振動を同時に与えて加工能率を向上させ、仕上げ工程においては低周波振動のみとして砥石に目づまりを起こして迅速に鏡面仕上げする方法である。この際超音波振動を用いた背分力方向振動切削によって得られる山数の多い微細凹凸表面を加工することで後加工である重畳超仕上げの切削加工工程において砥石の脱落と破碎をより活発にして切削加工能率を高め基礎円筒形状を悪化させず迅速に表面凹凸を除去することに優位に作用するものと考えられる¹⁶⁾。

2.2 背分力方向振動切削による理論表面粗さの解析

工具刃先を送り方向に振動させて切削した場合の理論表面粗さはすでにコンピュータ解析によって詳細に求められているが⁷⁾、本報告では背分力方向振動切削によって得られる理論表面粗さを簡便に示し、かつ従来求められている普通切削における理論表面粗さと比較を行うためにも図4に示すようにして幾何学的に求めることにした。切れ刃ノーズ半径 $R=0$ 、切込み角 K_1 、前切れ刃角 K_2 、送り S とした場合の工具振動の無い普通切削時の理論表面粗さ R_{th} はすでに明らかのように、

$$R_{th} = S / (\cot K_1 + \cot K_2) \quad \dots (1)$$

で示される²⁵⁾。(a) 図に示すように工具刃先に γ 方向の振幅 $2a$ を与えた場合、刃先 A 点が前進振動によって A' 点、刃先 B 点が後退振動によって B' 点に移動し、この場合の最大山高さ R_{th}' は $\triangle A'O'C$ によって求められる。A'—C が振動時の送りに相当するから、これを S' とし幾何学的に求めると

$$S' = S + 2a \cos \gamma + (2a \sin \gamma / \tan K_1) \quad \dots (2)$$

で表される。(1) 式中の S に (2) 式の S' をおきかえて振動時の理論表面粗さを R_{th}' とし求めると (3) 式によってあらわされ、さらに振動方向角 γ に関して単一项となるように整理し直すと (4) 式が得られる。

$$R_{th}' = S / (\cot K_1 + \cot K_2) + 2a \{ 1 / (\cot K_1 + \cot K_2) \} \times \{ \cos \gamma + (\sin \gamma / \tan K_1) \} \quad \dots (3)$$

$$R_{th}' = R_{th} + a A \sin (\gamma + K_1) \quad \dots (4)$$

ここに、

$$A = 2 \{ 1 / (\cot K_1 + \cot K_2) \} \times (1 + \cot^2 K_1)^{1/2}$$

である。

すなわち、振動時の理論粗さ R_{th}' は (4) 式が示すように普通切削による理論表面粗さ R_{th} と切れ刃振動によって得られる最大山高さの増加分 $\triangle R_{th} = a A \sin (\gamma + K_1)$ の和として表される。上式において工具振幅 a と工具振動方向角 γ を一定とし、送り S を変化させた場合の理論表面粗さ R_{th}' は無振動時の理

Fig.5 Ultrasonic tool vibration system

論粗さ R_{th} と平行な線図を示す。また工具振幅 a と送り S を一定にし、工具振動方向角 γ を変化させた場合の理論表面粗さは振動方向角 $\gamma = 0$ において最小値 $R_{th} + a \sin K_1$ 、 $\gamma = \pi/2 - K_1$ において最大値 $R_{th} + aA$ の正弦曲線を示す。

以上の関係は無振動時の切れ刃先端の工作物表面からの位置を切込み t としたときに図 4 (a) に示す $t + a \sin \gamma \geq R_{th}'$ の条件を満たす場合において成立する。図 4 (b) に示す $t + a \sin \gamma < R_{th}'$ の場合は切れ刃交点 O' は存在しないため R_{th}' は単純に工作物表面からの切込み深さ位置を示すことになる。すなわち表面粗さは $R_{th}' = t + a \sin \gamma$ (5) によって表される。

以上のように背分力方向振動切削においては、不感性振動切削機構によって高精度の基礎円筒形状が得られるが、表面粗さは普通切削に比べ理論上常に ΔR_{th} 大きな表面粗さを示すことになる。

3. 背分力方向振動切削装置および実験方法

実験はまず背分力方向振動旋削による切りくず生成現象を観察し、次に理論表面粗さを確認するために加工後の表面粗さとそれに関連して真円度を測定する。本研究で試作した超音波工具振動系を図 5 に示す。振動系はニッケル磁歪振動子を駆動源とし、これに振幅拡大用ホーンと縦振動バイトシャックをそれぞれハンダ接合して振動数 $f = 21.7 \text{ kHz}$ の超音波工具振動系を構成した。バイトシャックの振動節部をシャックホルダーによって支持し、このホルダーをクランプ用フレームに備えつけた締め付けねじによって固定する。この際シャックホルダー内面をシャック外周に吻合させ、ホルダーに設けたスリット部の微小弾性変形を利用してシャックを固定した。更に振幅拡大用ホーンのノード部もホルダークランプ用フレームに固定する。振動子は冷却用タンクを設けて水冷する。この振動系のホルダークランプ用フレームを池貝鉄工所製 EC16 型旋盤の工具取り付け台に固定できるようにした。そして実験においては工具の微小送り実験ができるように旋盤のテーブル縦送り駆動軸に別途設けた無段変速機と駆動モーターを連結して送りを与えることにした。図 6 に実験装置を示す。切れ刃角は図 7 に示すように、工具振動系を自由に傾けて工具取り付け台に固定することで前切れ刃角 K_2 と切込み角 K_1 を設定した。ここでテーブル縦送り方向に対する切れ刃振動方向の角度 $\gamma =$ 前切れ刃角 K_2 である。

Fig.6 Experimental apparatus

Fig.7 Means of vibration turning

Table 1 Experimental conditions

Rotational frequency	N	950min ⁻¹
(Cutting speed v)		(280—298 m/min)
Feed rate	S	2—50 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Depth of cut	t	2—1000 μm
Tool frequency	f	21.9kHz
Tool amplitude	a	9 μm
Cutting oil		Machine oil + Spindle oil (Viscosity 23mm ² /s)
Tool material		Carbide K10
Work material		Aluminum alloy A2017(HB78) Brass C3604 (HB114) Carbon steel S45C (HB187)
Work profile		Tool edge
$\phi D: 100\text{mm}$ $W: 15\text{mm}$		$\phi 20\text{mm}$ 13mm 10mm 6° 25°

実験条件を表 1 に示す。工具材質として超硬 K10 を用い、ノーズ角度 90° (切込み角 K_1 + 前切れ刃角 $K_2 = 90^\circ$)、横逃げ角 25° 、前逃げ角 6° とした。工具刃先の再成形は本来、条件の

[Cutting conditions] v : 280~298m/min, t : 50 μ m,
 S : 2~50 μ m/rev, f : 21.9kHz, a : 9 μ m, K_1 : 80°, K_2 : γ : 10°

Fig.8 Profile of chips in changing feed rate

[Cutting conditions] v : 280m/min,
 t : 50 μ m, S : 2~50 μ m/rev, f : 21.9kHz,
 a : 9 μ m, K_1 : 80°, K_2 : γ : 10°

Fig.9 Influence of feed rate S on surface roughness

異なる実験毎に行うべきであるが、本実験では連続して実験を行い、この間刃先を観察しながら適度な間隔で刃先を成形した。切りくずの寸断現象は工作物としてアルミニウム合金、炭素鋼、黄銅を用いて観察し、表面粗さと真円度はアルミニウム合金における実験結果を示す。工作物は外径 ϕ 100mm、幅15mmのものを用いたが、実験終了時の外径は ϕ 87mmである。切削液はマシン油とスピンドル油の混合油を用い、切削部とバイトシヤンクに約8 l/minの流量で供給した。表面粗さの測定は小坂研究所製 SE-3A 型万能表面形状測定器を、真円度の測定には東京精密製 ロンコム 2C 型真円度測定器を使用した。

4. 実験結果および考察

送りを変化させたときに得られる切りくず形状の観察、および加工表面粗さと真円度を測定する前に切込みを変化させた場合の表面粗さと真円度を測定し、切削時の加工負荷が両者に及

ぼす影響を観察しておくことにした。図示省略するがアルミニウム合金を用い工具振動数、振幅をそれぞれ $f=21.9\text{kHz}$, $a=9\mu\text{m}$, 送り $S=2\mu\text{m/rev}$, 切削速度 $v=280\text{m/min}$, 切れ刃振動方向角 $\gamma=10^\circ$ とし、切込みを $t=2\mu\text{m}\sim 1000\mu\text{m}$ と変化した予備実験においてさほど切込み量の影響を受けず、表面粗さ $2\mu\text{mRz}\sim 2.5\mu\text{mRz}$, 真円度 $0.7\mu\text{m}\sim 1.2\mu\text{m}$ が得られることを確認した。以降の実験においては従来振動切削において利用されている切込み量を選択し $t=50\mu\text{m}$ と固定し、送りと振動方向角（刃先角）を変化させて実験を行うことにした。

4.1 送り S を変化したときの切りくず形状の変化と表面粗さおよび真円度の考察

予備実験の結果を基に、送りを $S=2\mu\text{m/rev}\sim 50\mu\text{m/rev}$ と変化させて得られる各種工作物材質における切りくずの写真を図8に示す。ここで切削速度は実験を進めることで、各工作物外径が小さくなっていくため $v=280\text{m/min}\sim 298\text{m/min}$ の幅を持つが切りくず生成現象を確認する上では問題は無いものと考えている。いずれの工作物材質においても送り $S=4\mu\text{m/rev}$ までは細かく寸断された切りくずが多く観察されるが、 $S=10\mu\text{m/rev}$ では連続切りくずが多く混在し、工具両振幅 $18\mu\text{m}$ を越えた送り $S=30\mu\text{m/rev}$ 以上では連続切りくずのみとなる。炭素鋼、アルミニウム合金においては分断されるまで黄銅に比較して比較的長い切りくず形状を示すが、黄銅においてはなおよそ材料特性に起因して短寸の切りくず形状が概観される。しかし注視すると黄銅の場合も送りの変化に伴い、前記アルミニウム合金、炭素鋼の場合と同じように切りくず寸断の変化現象が観察される。以上のように材料特性の異なる3種の工作物を用いた円筒外周振動旋削において、送りの変化に対する切りくず寸断現象は第1報で得られた二次元振動切削の場合と同じように変化することが観察される。三次元切削においても切削機構の解析が有用であることがわかる。

前記条件で送りを変化させた場合のアルミニウム合金における表面粗さを図9に示す。図において理論粗さを第2章で求めた理論式(4)を利用して算出すると、 $S=0\mu\text{m/rev}$ において $3.1\mu\text{mRz}$, $S=50\mu\text{m/rev}$ において $11.6\mu\text{mRz}$ を結ぶ直線を示す。実験値における図中各点の変化傾向をみると、 $S=10\mu\text{m/rev}$ (図中 A 点) までは理論粗さに近い傾向を示しそれよりも大きい送りでは理論粗さよりも小さくなる傾向を示す。このときの切れ刃先端を観察すると微小摩耗が観察されることから、これに起因して表面粗さが減少しているものと推測される。すなわち摩耗によって生じる疑似刃先 R と送り量 S との関係において送りの小さい範囲においては隣り合う切削溝の R 部が交差することによって表面粗さが創生されるために、(4)式に示した R_{th} 部が実質減少し、一方では ΔR_{th} の占める割合が大きくなるために理論粗さに近い値を示すものと考えられる。送りの大きい領域では隣り合う切削溝の直線部が交差して表面粗さが創生されるため、刃先の摩耗量に応じた表面粗さの減少量がほぼ一定値を示す。その結果表面粗さ線図は本実験で用いた送りより大きい範囲では理論表面粗さ線図に平行となる線図を示すものと推測される。一般に送りを大きくすると加工表面粗さは理論粗さよりも大きくなる傾向を示すが本報告での結果はそれに反する結果を示している。本切削方法において良好な切削性を示すため、刃先の摩耗によって幾何学的に決定される表面粗さの減少がより顕著に表れる結果によるものと考えられる。送りの小さな範囲においては刃先の微小摩耗は生じているものの加工表面には工具の1サイクル振動によって加工表面に残される IT マーク²⁶⁾と虹面が観察される。良好な切削性を示

 Fig.10 Influence of feed rate S on roundness

 Fig.13 Influence of γ on roundness

Fig.11 Profile of Roundness

 Fig.12 Influence of γ on surface roughness

して理論粗さに近い微小凹凸の得られることがわかる。図 10 に送りを変化させたときの真円度を示す。図に示すように送りの増加に伴っておよそ右上がりの線図を示し、1.0 μ m~2.0

μ m と変化する。図 11 には送り $S=2\mu\text{m/rev}$, $10\mu\text{m/rev}$, $50\mu\text{m/rev}$ における真円度波形を示す。

以上のように、送りを小さくすることで真円度値が減少し主軸回転中心の振れに近い真円度を示すことが観察された。

4.2 工具振動方向角 γ を変化させたときの表面粗さと真円度の考察

送りを $S=4\mu\text{m/rev}$ とし、工具振動系の振動方向角を $\gamma=2\sim 40^\circ$ と変化させた場合の表面粗さと真円度を測定した。本来固定角度をさらに広範囲に設定し、切れ刃も $\gamma \neq K_2$ となるような工具刃先を数種準備して実験すべきであるが、本実験では簡略化し切れ刃先端形状を変えずに工具振動系の固定角度を前記範囲で変化させて実験を行った。表面粗さの実験結果を図 12 に示す。前節同様に第 2 章で求めた理論式 (4) を利用して表面粗さを算出すると振動方向角 γ の増加に伴い増加傾向を示し、 $\gamma=40^\circ$ で $R_{th}=13.5\mu\text{mRz}$ が得られる。実験結果は図示のように増加傾向を示すが、 $\gamma=40^\circ$ で $8.5\mu\text{mRz}$ と理論値よりも小さな値を示す。刃先振動角度の設定により微小刃先摩耗に起因した疑似刃先 R の影響が異なるものと推測される。すなわち大きな設定においては疑似刃先 R が表面粗さに及ぼす要因が大きいために刃先の摩耗量が顕著に表れるが、刃先角度の小さな設定においてはその傾斜分影響も小さくなるものと考察される。図 12 と同じ条件で工具振動方向角 γ を変化させた場合の真円度を図 13 に示す。実験結果は図に示すように γ を大きくするに伴って真円度も増加する傾向を示し、工具振動方向角 $\gamma=5^\circ$ で最小値 0.8 μm , $K_2=40^\circ$ で最大値 2.3 μm を示す。

以上の実験から、微小送りと工具振動方向角の小さな設定において、比較的理論粗さに近い表面粗さと高い真円度値の得られることがわかった。

5. 結 言

本報告では背分力方向振動切削を利用したときの基礎円筒形状の解析と理論表面粗さを求めた。理論表面粗さは普通切削に比べて工具を振動させた分それに応じて大きくなるが、切削時の工作物挙動は不感振動切削効果が発揮されて静止化するため、高精度の基礎円筒形状が得られることを示した。

実験は解析結果を確認するために円筒外周振動旋削実験を行い切りくず生成現象と円筒外周表面の表面粗さ、およびそれに関連して真円度を考察し下記に示す結果を得た。

- (1) 工作物材質としてアルミニウム合金、黄銅、炭素鋼材を用い、工作物回転数 $N=950\text{r/min}$ (切削速度 $v=280\text{mm/min} \sim 298\text{mm/min}$), 工具振幅 $a=9\mu\text{m}$, 切込み $t=50\mu\text{m}$ とし、

送りを $S=2\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}/\text{rev}$ と変化させた円筒外周振動切削実験による切りくず寸断現象は前報における二次元振動切削時の現象と類似の現象を示すことが分かった。

- (2) (1) 項の切削条件におけるアルミニウム合金の表面粗さは送り $S=10\mu\text{m}/\text{rev}$ 以下において理論粗さに近い表面粗さの傾向を示すがそれを越えた送りでは理論粗さよりも小さくなる傾向を示す。このときに得られる真円度は $1\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ を示し、送りの増加に伴って増加傾向を示す。
- (3) 切削速度 $v=280\text{m}/\text{min}$ 、工具振幅 $a=9\mu\text{m}$ 、切込み $t=50\mu\text{m}$ 、送り $S=4\mu\text{m}/\text{rev}$ と一定にし、工具振動方向角度 γ を変化させた場合のアルミニウム合金における表面粗さは γ の小さい領域において理論粗さに近い値を示し、大きな範囲では理論粗さよりも小さくなる傾向を示した。このとき測定した真円度は $0.8\mu\text{m}\sim 2.3\mu\text{m}$ である。

本報においては円筒外周振動旋削を行って切りくず形状、および表面粗さと真円度を考察し、解析で示した切削機構のモデル化と理論表面粗さはおおよそ妥当であることを確認した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、ご指導をいただいた故宇都宮大学 隈部淳一郎教授と実験にご協力をいただいた当時学生の方今成徹氏、野原茂、志茂浩志、笹井康直各氏にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 笠原英志, 谷口紀男: 振動送り切削による切屑切断, 昭和 42 年度精機学会春季大会学術講演前刷, (1967) 37
- 中川威雄, 鈴木清, 植松哲太郎, 小川浩幸: びびり振動切削による金属短繊維の製造, 精密機械, 47, 11 (1981) 1399.
- K.Nakayama, M.Arai, T.Kondo: Cutting Tool with Curved Rake Face-A means for Breaking Thin Chips, Annals of the CIRP, 30,1(1981)5.
- K.Okamura, H.Sasahara, T.Segawa and M.Tsutsumi: Low-Frequency Vibration Drilling of Titanium Alloy, JSME International Journal, Series C, 49,1, (2006) 76.
- B.A.Woody, K.S.Smith, D.J.Adams, Barkman, W.E: Chip Breaking in Turning Operations using CNC Toolpaths, Society of Manufacturing Engineers, Transactions of NAMURI 36.(2008).
- B.A.Woody, K.S.Smith, D.J.Adams, Barkman, W.E, Assessment of the Process Parameters and their Effect on the Chip Length When Using CNC Toolpaths to Provide Chip Breaking in Turning Operations. Proceedings of the 3rd ASME MSME Conference, Evanston, USA.(2008).
- S.Smith, B. Woody, W. Barkman, D. Tursky: Temperature control and machine dynamics in chips breaking using CNC toolpaths, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 58,(2009)97.
- S.Smith, J.McFarland, T. Assaid, D.Tursky, W. Barkman, E.Babelay: Surface characteristics generated in CNC chip Breaking tool paths. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 59,(2010)137.
- 隈部淳一郎, 寒風沢毅, 早乙女辰男: 木材の精密穴加工に関する研究 (第3報), 精密機械, 43, 6 (1977) 683.
- 鬼鞍宏猷, 大西修, 馮金海, 神田敏和, 森田貴博: 超音波振動が小径穴の加工精度に及ぼす影響, 精密工学会誌, 62, 5 (1996) 676.
- 竹山秀彦, 加藤俊二, 石渡昭一, 竹治裕幸: ばりの抑制を目的とする振動穴あけに関する研究, 59, 10 (1993) 1719.
- 隈部淳一郎, 西尾彰文, 高山孝司: セラミックスの精密重畳振動ねじ立て, 55, 11 (1989) 1981.
- 相馬伸次, 神雅彦, 早乙女辰男: ゴムの精密振動研削に関する基礎的研究 (第2報), 1994 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1994) 495.
- 隈部淳一郎, 横井文夫, 早乙女辰男: 超音波振動切削による切りくず寸断に関する研究, 昭和 57 年度精機学会春季大会学術講演会論文集, (1982) 684.
- 隈部淳一郎: 振動切削 - 基礎と応用 -, 実教出版 (1979) 70.
- 早乙女辰男, 佐藤啓仁: 重畳超仕上げに関する研究 (第1報), 日本機械学会論文集, 75, 751 - C (2009) 741.
- 早乙女辰男, 佐藤啓仁: 重畳超仕上げに関する研究 (第2報), 日本機械学会論文集, 75, 758 - C (2009) 2822.
- 隈部淳一郎, 平井聡, 早乙女辰男: 振動切削による超精密円筒加工, 精密工学会誌, 53, 11 (1987) 1752.
- 早乙女辰男, 佐藤啓仁: 超音波振動切削に関する研究 (第1報), 精密工学会誌, 77, 6 (2011) 559.
- 社本英二, 森本祥之, 森脇俊道: 楕円振動切削加工法 (第1報), 精密工学会誌, 62, 8 (1996) 1127.
- 隈部淳一郎: 超音波振動切削に関する研究 (第3報), 日本機械学会論文集, 27, 181 (1961) 1400.
- 高萩靖, 大根田浩久, 軽部周, 早乙女辰男, 佐藤啓仁: 振動切削モデルにおける動的挙動の分類, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2003 講演論文アブストラクト集, 217.
- 15)に同じ p.103
- 15)に同じ p.86
- 日本機械学会: 機械工学便覧 (第6版), p17-127
- 10)に同じ p.57.