超音波振動切削に関する研究 (第3報) *

一背分力方向振動切削・重畳超仕上げ複合システムによる高精度円筒加工一

早 乙 女 辰 男** 佐 藤 啓 仁***

Study on Ultrasonic Vibration Cutting (3rd Report)

—Multiple Precision Cylindrical Machining with Combining Ultrasonic Vibration Cutting on Thrust Force Direction ,
and Superposition Superfinishing Process—

Tatsuo SOUTOME and Keijin SATO

The objective of this investigation is an invention of theory and technics on high precision cylindrical machining with combining ultrasonic vibration cutting on thrust force direction, and superposition superfinishing process. In this report, it is analyzed that multiple precision cylindrical machining is possibly achieved with using insensitive vibration cutting mechanism on thrust force direction, and microgroove self control mechanism on superposition superfinishing. The experiments for precision cylindrical machining have been done, after some testing for deciding a suitable condition on ultrasonic vibration cylindrical turning on thrust force direction, and superposition superfinishing. In the multiple experiments, roundness $0.3\mu\text{m} \sim 0.6\mu\text{m}$, surface roughness $0.1\mu\text{mRz} \sim 0.2\mu\text{mRz}$ could be achieved for aluminum alloy, brass and carbon steel. These results indicate that multiple machining system is appropriate for precision cylindrical machining.

Key words : ultrasonic vibration cutting, multiple precision machining, superposition superfinishing, thrust force direction, roundness, surface roughness, microgroove self control mechanism

1. 緒 言

本研究の目的は第1報¹⁾で創案した切りくず寸断法, すなわち背分力方向の超音波振動切削を利用して高精度複合円筒加工を試みることである. 第1報, 第2報²⁾では背分力方向振動切削機構と理論表面粗さの解析を行った. 普通切削に較べて表面粗さが大きくなる一方, これまで主分力方向振動切削で利用できなかった臨界振動切削速度 $v_c = 2\pi af$ (a : 工具の振動片振幅, f : 工具の振動数) 以上の高速振動切削条件において切削力を規則的かつ断続的に作用させて切削時の工作物挙動を静止化できる効果があることを示した. そして中空円筒端面を利用した二次元切削および円筒外周三次元切削においておおよそ機構解析のとおり切りくずが寸断され, 旋盤主軸回転中心の振れ精度に近い真円度と理論表面粗さに近い比較的均一な表面粗さが得られることを観察した.

そのように本切削法によって工作物挙動を静的微小変位とすることで理想的基礎真円 (円筒旋削時の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) の得られることは想定されるが, 切れ刃を工作物回転中心方向に振動させる限り必然的に大きな表面粗さとなり真円度 ≈ 0 , 表面粗さ ≈ 0 の円筒を得るためには別な改善手段が必要となってくる.

著者らは別途報告³⁾において, 主分力方向の振動切削と重畳超仕上げ法⁴⁾を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. すなわち振動切削を行った後に重畳超仕上げを行い, 振動切削によって得られた真円に対する僅かな形状誤差を改善して超精密円筒加工を行う方法である. 本研究における背分力方向振動切削も前述の複合加工と同様に前加工として利

用すれば, 後工程である重畳超仕上げによって表面性状が改善され高精度複合円筒加工が期待できるものと考えた.

本報告では以上のような考えに基づき, まず背分力方向振動切削に重畳超仕上げを複合させることで高精度複合円筒加工できることを解析した. 次に実験では実際に複合円筒加工を行うことにより表面粗さと真円度が改善されることを確認した. 本報告での実験結果は旋盤主軸や送りテーブルに高精度の非接触軸受けやガイドを用いるなどして得られる超精密円筒加工精度には到達していないが本研究で提案する高精度複合円筒加工システムの妥当性を確認できたので報告する.

2. 高精度複合円筒加工方法の解析

2.1 複合円筒加工システムについて

図1に円筒外周普通旋削における工具—工作物振動系を示す. 真円度 ≈ 0 の理想円を得るためには工作物回転中心の振れ, および切削時の工具, 工作物の挙動をゼロとすることが必要である. 実際の旋削作業においては主軸回転中心の振れと, 工具—工作物振動系におけるばね定数 k_w , k_T や粘性係数 C_w , C_T に起因した弾性振動を伴うため目標の理想円は得られず不規則な真円度波形と真円誤差 ΔR を示すことになる⁵⁾. これまで旋盤主軸や送りテーブルに非接触軸受けやガイドを用いて工作機械要素の精度を高め, これに振動切削装置を取り付けて切削しても目標の真円度 ≈ 0 , 表面粗さ ≈ 0 , 円筒度 ≈ 0 が得られないため, 重畳超仕上げを複合させることで超精密円筒加工⁴⁾を達成している. 後工程である重畳超仕上げによって理想的基礎真円に重畳した真円誤差 ΔR が改善されることに着目すると, 図2に示すような背分力方向振動切削を利用した高精度複合円筒加工も考えられる. (a) 図に示すように工作物回転中心方向に片振幅 a , 振動数 f で振動する刃先の運動軌跡は切削速度 v で回転する工作物外周上に $lr = v/f$ の規則的なピッチを持った正弦状の運

* 原稿受付 平成25年11月22日

** 正会員 (株)パイロットコーポレーション (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)

Fig.1 Tool-work vibration system

F, A : Low frequent vibration (A : amplitude, F : frequency),
 f, a : Ultrasonic vibration, (a : amplitude, f : frequency),
 k_w, k_T : Spring constants of work and tool, P : Stone pressure,
 C_w, C_T : Damping coefficients of work and tool, x : Work distance,
 v : Cutting speed, M_w : Equivalent mass of work, $P_t(t)$: Cutting force

Fig.2 Multiple precision machining process

動軌跡を示すため、その最大切込み点 1, 2, 3, ... の点を結ぶ基礎円に振幅 $2a$ によって得られる表面粗さ成分 (高周波成分) が重畳する軌跡を示すことになる。したがって基礎円に重畳した高周波成分を (b) 図に示す重畳超仕上げによって基礎円形状を崩さずに能率的に除去することができれば主軸の振れ精度に近い真円度と表面粗さが得られるものと考えられる。

次節においてはこれを可能とするための背分力方向振動切削による不感性振動切削機構、および重畳超仕上げによる能率的表面微細みぞ自成機構とそれが加工表面性状に及ぼす効果について説明する。

2.2 背分力方向振動切削による不感性振動切削機構

工具刃先を背分力方向に振動数 f 、振幅 a で振動させ、切削速度 v 、送り S とした場合の切削機構図を図 3 に示す。送り方向の工具振幅は図に示すように、工具振動方向が送り方向に対し γ 傾斜した場合を設定し $a_\gamma (= a \cos \gamma)$ を用いた。そして実際に得られる切れ刃運動軌跡は正弦状であるが本解析では簡略化して三角波の軌跡によって考える。切れ刃逃げ面と工作物表面の干渉を防ぐためには、切れ刃逃げ角 $\alpha >$ 切れ刃運動角 θ

Fig.3 Cutting mechanism and insensitive vibration Cutting model

$\{ = \tan^{-1}(4a_\gamma f / v) \}$ とする必要があり、切削速度を大きくすることが有利である。ここで切削機構図に示す運動軌跡は、送り方向における前回切削の軌跡 $A_1-B_1-C_1 \cdots$ と今回切削の軌跡 $A_2-B_2-C_2 \cdots$ において刃先振動前進時の軌跡が一致する位相差 $\varphi = (\pi S / 2a_\gamma)$ の場合について示した。

すでに既報¹⁾において解析したように工具振幅 $2a_\gamma \geq$ 送り S において切りくずが寸断される条件 $\varphi \geq |\pi S / 2a_\gamma|$ と寸断されない条件 $\varphi < |\pi S / 2a_\gamma|$ の場合が混在するが、実際の旋削において高速切削速度、微小送り条件において切りくずがほぼ針状に寸断されることを観察している。この寸断結果から本解析では切削機構を単純化して前回切削と今回切削における切れ刃運動軌跡の位相差が $\varphi = (\pi S / 2a_\gamma)$ の場合をモデル化して解析を行なうことにした。図において $A_1-B_2, C_1-D_2, \cdots$ の区間で切れ刃が工作物に食い込み、切削方向に対し順次 $a, b, c, \cdots$ の切りくずを生成、寸断しながら切削力を発生させる。 $B_2-C_1, D_2-E_1, \cdots$ の区間では工作物への食い込みがゼロのため切りくずは生成されず切削力はゼロとなる。この時、送り方向には順次①, ②, ③, ... の切りくずが生成されることを示す。このように振動周期 $T (= 1/f)$ のうち正味切削時間 t_{ct} を示す規則的な断続的切削力が発生する。本解析ではこの断続的な切削力 $P_t(t)$ をパルス状の波形として考え、これが図 2 (a) に示す工作物振動系に作用したときの工作物変位 x を求める。 $\omega / \omega_n \gg 1$ 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), $x = (t_{ct} / T) \cdot (P_{tt} / k_w) \eta$ の静的変位成分のみで表される。高速普通切削時における理想化された切削力波形 $P_t(t) = P_u \text{mean} + p_u \sin \omega t$ が作用した場合の工作物変位 $x = P_{tt} / k_w$ ⁸⁾ に比較し、さらに t_{ct} / T 倍小さな工作物変位を示す。すなわち本報告での高速背分力方向振動切削モデルにおいても主分力方向振動切削時に得られる不感性振動切削機構⁷⁾が適用され、工作物挙動を小さくして主軸の振れ精度に近

Fig.4 Superposition superfinishing process (SSF process)

F, A : Low frequent vibration (A : Amplitude, F : Frequency),
 k_w : Spring constants of work, C_w : Damping coefficients of work,
 M_w : Equivalent mass of work, P : Stone pressure, T : Period of tool vibration,
 f_s : Frequency of cutting force, $P_t(t)$: Cutting force, v : Cutting speed

Fig.5 Microgroove self control mechanism on superposition superfinishing

い基礎円形状が得られることを示す。

2.3 重畳超仕上げによる表面微細みぞ自生機構

図4に重畳超仕上げ方法 (SSF process) を示す。この方法は微細砥粒砥石を用い、(a) 図の切削加工工程においては砥石に 20 k Hz 以上の超音波振動と 20~50 Hz 程度の低周波振動を同時に与えて (SVC process) 加工距離と最大交差角 θ (図5参照) を大きくする⁹⁾。さらに見かけ上の砥石結合度を低くす

る相当結合度特性¹⁰⁾も加味されて砥石・砥粒の脱落と破碎を活発にして加工能率を高める。その砥石本来の表面粗さに仕上げたところで、(b) 図に示す鏡面仕上げ工程においては超音波振動を停止して低い振動のみの超仕上げ (SF process) によって砥石に目づまりをおこして迅速に鏡面仕上げを行う方法である。鏡面仕上げに適した微細砥石を用い加工能率を高めることに主眼をおいた方法である。砥石を定荷重 P で工作物に押し付けて加工する方式であるため、おおよそ工具—工作物振動系のばね定数や粘性係数を考慮する必要がなく簡便に鏡面仕上げできる方法である。しかし、より高品位の鏡面を得るためには工作物振動系を考慮し研削時の砥石・工作物間に発生する微小な相対的振動変位が表面粗さに及ぼす影響を検討しておく必要がある。

SF 加工によって工作物表面に描かれる砥粒の運動軌跡とそれによって得られる表面性状を図5に示す¹¹⁾。ここでは1個の砥粒に着目して運動軌跡を描くと工作物回転周期と砥粒の振動周期の違いによって、回転毎に位相差が生じるため順次 1, 2, 3, ... の運動軌跡を描くことになる。この時、例えば1の軌跡によって得られた切削溝を順次 a, b, c, ... 点において軌跡が交差する。時間の経過に伴って運動軌跡 (砥粒痕) が増加するため加工表面の微細凹凸は規則的な三角形状の加工表面としてモデル化して表すことができる。この三角形状の表面を円錐状の砥粒切れ刃によって削る場合、切削力は図示のような三角形状の切削力 P_t を示すことになる。この規則的に作用する切削力 $P_t(t)$ をフーリエ級数展開すると、

$$P_t(t) = \frac{1}{2} \cdot P_t + \frac{2P_t}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \cdot (\cos n\pi - 1) \cdot \cos n\omega t \cdots (1)$$

によって表され、これが一自由度の工作物振動系に作用した場合の運動方程式は (2) 式によって示される。したがって、

$$M_w \frac{d^2x}{dt^2} + C_w \frac{dx}{dt} + k_w x = P_t(t) \cdots (2)$$

$$x = \frac{1}{2} \cdot \frac{P_t}{k_w} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{P_t}{k_w} \cdot \frac{2}{n^2 \pi^2} \cdot (\cos n\pi - 1)}{\sqrt{(1 - n^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2})^2 + 4n^2 \nu^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n) \cdots (3)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \frac{1 - n^2 \frac{\omega^2}{\omega_n^2}}{2n \nu \frac{\omega}{\omega_n}}$$

工作物変位 x は (3) 式で表され、 $\omega/\omega_n \gg 1$ の条件を満たす場合、 $x = (1/2) \cdot (P_t/k_w)$ の静的変位成分のみとなり前節で記述したように高速普通切削時の工作物変位 $x = P_t/k_w$ に比べ 1/2 倍小さくなることを示す。

ここに、 $\nu = C_w/C_{wc}$ (C_w : 工作物の粘性減衰係数, C_{wc} : 工作物の臨界粘性減衰係数), ω : 切削力の角振動数, ω_n : 工作物の背分力方向角固有振動数を示す。

この解析結果は砥石各砥粒において同様に解析されることから、砥石全体においても同様の効果を示すものと考えられる。

切削加工工程である重畳振動仕上げ (SVC) においては低周波振動のみの SF 加工に比べて単位時間当たりの砥粒切れ刃の交差回数が桁違いに増加する。すなわち砥粒運動軌跡の多重性¹²⁾が増加する。

そのように、SVC 加工では SF 加工に比べて運動軌跡交差回数の増加に伴い表面性状が短時間に微細化されるため、モデル化した切削力波形の振動周期 $T (= 1/f_s)$ は短時間に短くなる。

Fig.6 Structure of ultrasonic tool vibration system

Fig.7 Experimental apparatus

Fig.8 Means of vibration turning

Fig.9 Structure of ultrasonic stone vibration system

したがって早期に $\omega/\omega_n \gg 1$ の条件を満たすことになり、(3) 式中の変動成分を早期にゼロとして工作物・砥石間に発生する微小振動を安定化させ、砥石振動が工作物表面に及ぼす影響を少なくすることができる。この現象と効果が表面微細みぞ自成機構¹³⁾であり、低周波振動のみの SF 加工に比較してより顕著な効果が期待できる。

以上のように重畳振動砥粒による表面微細みぞ自成機構において高能率化と不感振動切削効果が期待され高品位の微細表面の得られることが解析される。

3. 複合円筒加工実験装置および実験条件

第2章での解析結果を確認するために本実験では池貝鉄工所製 EC16 型旋盤を用い、これの往復台上に背分力方向振動切削装置と重畳超仕上げ装置を取り付けられるようにして実験用複合円筒加工旋盤を試作した。

前加工として用いる背分力方向振動切削のための超音波工具振動系を図6に示す。ニッケル磁歪振動子を駆動源とし、これに一次の縦振動振幅拡大用ホーンと二次の縦振動パイロシヤックをはんだ接合し、刃先端で片振幅 $9\mu\text{m}$ 、振動数 21.7kHz が得られるようにした。パイロシヤックの振動節部をシヤ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用ねじによって固定する。振動子は冷却用タンクを設けて水冷する。切削実験はこの振動系のホルダー・クランプ用フレームを旋盤の工具取付け台に固定し、図7に示す背分力方向振動切削装置を完成した。この際、図8に示すように図6の工具振動系を種々傾けて旋盤刃物台に固定し、テーブル縦送り方向に対する工具振動方向角 γ を変化した場合の予備実験を行って適正な加工条件を検討することにした。この時、同時に切込み角 K_1 と前切れ刃角 K_2 も変化する。本実験に用いる刃先形状から、切れ刃振動方向の角度 $\gamma =$ 前切れ刃角 K_2 である。工具材質は超硬 K10 を用い、ノーズ角度 90° (切込み角 $K_1 +$ 前切れ刃角 $K_2 = 90^\circ$) とした。

後加工である SSF 加工に用いる超音波砥石振動系を図9に示す。固有振動数 20kHz のフェライト磁歪振動子を駆動源とし、これに一次の縦振動振幅拡大用ホーンを2液式エポキシ系接着材にて接合する。さらにホーン先端に三次の曲げ振動砥石シヤックをねじ結合することでシヤック両端に接着した砥石が超音波振動するようにした。実験にあたり種々行った予備実験から

Fig.10 Experimental apparatus

Table 1 Experimental conditions

Vibration cutting conditions			Superposition superfinishing conditions		
Frequency	f	21.9kHz	Frequency	F	20.5Hz
Amplitude	a	9 μ m	Amplitude	f	19.2kHz
Cutting speed	v	160-185m/min	Amplitude	A	0.7mm
Feed rate	S	2 μ m/rev	Amplitude	a	7.5 μ m
Depth of cut	t	$t_1=10\mu$ m, $t_2=2\mu$ m	Stone		GC3000PVA WA3000RH40V
End cutting edge angle	K_2	10°	Stone pressure	P	9.8—58.8kPa
Entering angle	K_1	80°	Rotational frequency	N	150, 235min ⁻¹
Cutting oil		Machine oil + Spindle oil (Viscosity : 23mm ² /S)	Feed rate	S	0.03, 0.05 μ m/rev
Tool material		Carbide K10	Machining oil		Lite oil + Machine oil (Viscosity : 8.8mm ² /S)
Work material		Aluminum alloy (A2017 : H _B 78) Brass (C3604 : H _B 114) Carbon steel (S45C : H _B 187)

Aluminum alloy

Brass

Carbon steel

Fig.11 Surface roughness and roundness by ultrasonic vibration cutting

図示のようなセグメント砥石が表面粗さに適正であることがわかったので図示形状の砥石を用いることにした。以上の砥石振動系にホーンクランプ用フレームを装着し、これを利用して砥石加圧ユニットに装着する。さらにこの加圧装置を図10に示す低周波振動装置に取り付けて重畳超仕上げ装置を完成した。低周波振動は振動軸内部に内蔵したピストンを圧縮空気によって自励振動させ、このピストンの往復振動を加振源とし、これにばねを介して振動軸を励振させる方法により発生させる。これにより駆動装置として偏心カムを用いた場合などに発生する不要な機械振動を取り除き仕上げ面に及ぼす影響を極力少なく

Aluminium alloy

Brass

Carbon steel

SF : Superfinishing process
SVC : Superposition vibration cutting process
SSF : SVC+SF (Superposition Superfinishing process)

Fig.12 Surface roughness and roundness by superposition superfinishing

できるようにした。

以上の装置を用い種々予備実験を行ない最終的に選択された実験条件を表1に示す。工作物としてアルミニウム合金、黄銅、炭素鋼を用い、初期外形 ϕ 100mm、幅15mmのものを用いた。背分力方向振動切削における切削条件は振動方向角 $\gamma=10^\circ$ 、作用前切れ刃角 10° 、前逃げ角 6° 、切込み角 80° 、作用逃げ角 25° とした。切削速度は $v=160\sim 185\text{m/min}$ ($N=950\text{min}^{-1}$)と設定した。切れ刃逃げ角 α =運動角 θ となる切

削速度は約 100m/min であるから本実験で用いる切れ刃逃げ角度は工作物との干渉に対し、十分な逃げ角度を有している。切削油はマシン油とスピンドル油を 5:5 の比率とした混合油を用い切削部およびバイトシャンク部に約 8 l/min で供給した。SSF 加工においては工作物材質によって GC3000PVA 砥石と WA3000RH40V 砥石を用い、工作物回転数として $N=150^{-1}$ ($v=40\sim 46\text{m/min}$)、 235min^{-1} ($v=72\text{m/min}$) を用いた。工作液は工作油の粘性を考慮してマシン油と軽油を 3:7 の比率とした混合油を用い、約 10 l/min で供給した。

以上の条件で例えばアルミニウム合金における普通切削時の背分力 $P_{tt\text{mean}}$ 、すなわち振動切削における矩形状背分力の最大値を、比較的切削断面積の大きい実験結果¹⁴⁾から本実験での $S=2\mu\text{m/rev}$, $t_f=10\mu\text{m}$ より切削断面積の場合について類推して求めると数 10^{-2}N が得られる。しかし断面積が極微小であることを考慮すると 10^{-1}N ～数 N 程度 (主分力比 30%程度として) に増加することが予測される¹⁵⁾。また、重畳超仕上げにおける砥粒一個当たりが受け持つ背分力 P_t は砥粒率を 25%とした場合に約 $(0.98\sim 5.9) \times 10^{-6}\text{N}$ 程度になるものと予測される。

4. 実験結果および考察

実験ではまず背分力方向振動切削によって前加工を行なう。アルミニウム合金、黄銅、炭素鋼の各種工作物に対して、それぞれ $\alpha > \theta$ の条件を満たす切削速度として $v=176\text{m/min}$, $v=160\text{m/min}$, $v=185\text{m/min}$ を利用した。そして切込みを $t_f=10\mu\text{m}$, $t_z=2\mu\text{m}$ と二段階に与えて旋削仕上げを行なうことにした。いずれの工作物においても背分力方向振動切削後の加工表面は一樣な加工表面を示し、表面には虹面が観察される。この時の表面粗さピロフィールと真円度波形を図 11 に示す。アルミニウム合金において真円度 $1.2\mu\text{m}$ 、表面粗さ $3\mu\text{mRz}$ 、黄銅において真円度 $0.9\mu\text{m}$ 、表面粗さ $2\mu\text{mRz}$ 、炭素鋼において真円度 $1\mu\text{m}$ 、表面粗さ $3.5\mu\text{mRz}$ が得られることを測定、確認した。

次に工作物の測定の後に、再度工作物を旋盤主軸に取り付けて後工程である SSF 加工を行なうことにした。本来は工作物をワンチャックのまま複合加工を行うべきであるが、本実験では背分力振動切削による加工精度を測定するために一度取り外すことにした。砥石の選択に当たり、アルミニウム合金や黄銅などの軟質金属に対しては切削加工工程における切削痕が鏡面仕上げ工程において残らぬよう砥石に弾性を有する GC・PVA 砥石を用いることにした。炭素鋼に対してはその予備実験から GC・PVA 砥石を用いると砥石の損耗が著しく、前加工表面粗さを十分に除去できないため砥石選択の際には切削加工量を重視して WA3000RH40V 砥石も用いることにした。WA 砥石によって SVC 加工を終了した後に、#3000 の GC 砥石で SSF 加工する方法が予備実験の範囲では最適であることがわかった。

図 11 に示した振動切削による前加工面を表 1 の条件で SSF 加工を行なった実験結果を図 12 に示す。アルミニウム合金に対し真円度 $0.3\mu\text{m}$ 、表面あらさ $0.1\mu\text{mRz}$ 、黄銅に対し真円度 $0.4\mu\text{m}$ 、表面あらさ $0.1\mu\text{mRz}$ 、炭素鋼に対し真円度 $0.6\mu\text{m}$ 、表面あらさ $0.2\mu\text{mRz}$ の結果が得られた。いずれの工作物においても表面粗さはおおよそ $0.05\mu\text{mRz}$ を示しているが、アルミニウム合金と黄銅では加工表面の局部に $0.1\mu\text{m}$ 、炭素鋼では $0.2\mu\text{m}$ の切削痕が残っているためこの値をとって表面粗さの山高さとした。このように工作物表面は図中の加工表面の写真からもわかるようにスケールの文字がひずみ無く写る鏡面を示しているのがわかる。背分力方向振動切削を行なった後に SSF 加工を行なうことで、切削後の $2\sim 3.5\mu\text{mRz}$ の表面粗さを $25\sim 30$ 分で除去して

$0.1\sim 0.2\mu\text{mRz}$ の表面粗さとし、 $0.9\sim 1.2\mu\text{m}$ の真円度を普通旋盤主軸回転中心の振れ精度 $0.7\mu\text{m}$ を上回る $0.3\sim 0.6\mu\text{m}$ の真円度とすることができた。主軸の回転挙動も背分力方向振動切れ刃の運動軌跡と同じように基礎基準円に高周波成分として重畳しているものとして捉え、SSF 仕上げによって回転中心の変動に起因した真円度も改善されるものと考えられる。

5. 結 言

本報告では高速域切削速度を利用できる背分力方向振動切削と、これに重畳超仕上げを複合した高精度円筒加工システムを考案し、解析と実験から下記の結果を得た。

- 1) 背分力方向振動切削機構の解析から、高速振動切削において切削力波形を規則的なパルス状波形とし、これを工作物に作用させることで切削時の工作物挙動を静的微小変位とできることから高精度の基礎円形状が得られることを示した。さらに重畳超仕上げの機構解析から、切削加工工程である重畳振動仕上げによって前記基礎円に重畳する表面粗さ成分 (高周波成分) を高能率で除去できる効果について示した。そして各砥粒軌跡によって創生される微細みぞ自成機構によって短時間に砥石、工作物の微小振動を静止化し、高品位の表面を得るために効果的に作用することを示した。
- 2) 1) の解析結果を実験によって確認した。アルミニウム合金において真円度 $0.3\mu\text{m}$ 、表面粗さ $0.1\mu\text{mRz}$ 、黄銅において真円度 $0.4\mu\text{m}$ 、表面粗さ $0.1\mu\text{mRz}$ 、炭素工具鋼において真円度 $0.6\mu\text{m}$ 、表面粗さ $0.2\mu\text{mRz}$ の高精度円筒加工できることを確認した。

以上において背分力方向振動切削と重畳超仕上げを複合させた加工システムにより高精度円筒加工できることを示した。本実験では高精度の機械要素を利用していないため超精密レベルの精度に到達していないが、解析で示した高精度複合円筒加工方法の妥当性については確認できたものと考えられる。

謝 辞

本研究を進めるに当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いただいた当時学生の今成徹氏と野原茂氏に深くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 早乙女辰男, 佐藤啓仁: 超音波振動切削に関する研究 (第 2 報), 精密工学会誌, **79**, 8 (2013) 766.
- 3) 隈部淳一郎: 振動切削 - 基礎と応用 -, 実教出版 (1979) 56.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 3)に同じ, p103.
- 7) 3)に同じ, p73.
- 8) 3)に同じ, p82.
- 9) 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.
- 10) 隈部淳一郎, 坂口克己: 振動砥石の相当結合度特性, 精密機械, **37**, 9 (1971) 629.
- 11) 早乙女辰男, 佐藤啓仁: 重畳超仕上げに関する研究 (第 4 報), 日本機械学会論文集, **76**, 767 - C (2010), 1850.
- 12) 田仲行雄, 矢野章成, 新家昇: 超音波振動研削の研究 (第 1 報), 精密機械, **34**, 10 (1968) 687.
- 13) 3)に同じ, p84.
- 14) 社本英二, 馬春翔, 森脇俊道: 楕円振動切削加工法 (第 3 報), 精密工学会誌, **65**, 4 (1999) 589.
- 15) 3)に同じ, p38.