重畳超仕上げに関する研究*
(第1報)早乙女 辰男^{*1}, 佐藤 啓仁^{*2}Study on Superposition Superfinishing
(1st Report)Tatsuo SOUTOME^{*3} and Keijin SATO^{*3} PILOT Corporation,
1-4-3 Nishiyahata, Hiratsuka-shi, Kanagawa, 254-8585 Japan

The objective of this investigation is to clarify a new and high efficient mirror machining, that can be named superposition superfinishing (SSF process) using a fine abrasive stone. In this machining, at first process (SVC process: superposition vibration cutting) high efficient cutting is achieved with simultaneously providing (20~50 Hz) low frequent vibration and ultrasonic vibration above 20 kHz on fine abrasive stone, and at next process (SF process: superfinishing) mirror surface can be obtained in a short time with only low frequent vibration. In this report, it is shown that basic machining characteristics and possibility of high efficient mirror machining on this new process are practically confirmed by several experiments.

Key Words: High Efficiency, Mirror Machining, Ultrasonic Vibration, Superposition Superfinishing, Vibration Cutting, Fine Abrasive Stone

1. 結 言

鏡面加工方法にはダイヤモンドバイトを用いた鏡面切削や砥石・砥粒を用いた鏡面研削, ラッピング, 超仕上げなどが挙げられる. 本研究では中でも超仕上げを取り上げて能率的鏡面仕上げ方法を究明する.

超仕上げによる加工能率の向上に関しては, 塩崎や加藤らによる 5000Hz 程度までの電磁振動を利用した研究⁽¹⁾ や田中, 矢野らによる 20 kHz 以上の超音波振動を利用した研究⁽²⁾ などがある. これらの研究報告によって砥石の振動数を高めると砥石の切れ味が向上して切削加工能率が向上することは究明されたが, 最終目標とする鏡面仕上げについては十分な検討がなされていないようである.

一方, 加工能率の向上に関し, 著者は隈部と共に振動研削・振動切削を基本にして種々検討と実験を重ね, 重畳超仕上げ法 (SSF 加工法: Superposition superfinishing) と名づける新しい鏡面加工方法を創案し, 発表してきた⁽³⁾. すなわち, 鏡面仕上げに適した微細砥粒砥石に 20 kHz 以上の超音波振動と従来超仕上げに利用されている 20~50Hz 程度の低周波振動を与え, 両者の振動をうまく使い分けることで能率的な

鏡面加工を行う方法である. 異なる周波数の振動を重畳させて加工能率を高める研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾は幾つかあるが, 本研究では超仕上げの立場で機構究明する.

重畳超仕上げ方法に関し, すでに応用的研究⁽⁶⁾や振動切削を前加工とした複合加工による超精密円筒加工を報告⁽⁷⁾してきているが, 基礎的研究内容に関しては未発表である.

本報告では, まず, 重畳超仕上げ方法が簡便で能率的鏡面加工方法であることを解析的に検討する. 次に, この方法による加工特性を確認するために, 実用的立場から種々実験を行い, 加工量, 砥石損耗量, 表面粗さを測定し, 従来の超仕上げ砥石に超音波振動を重畳させた場合の加工現象について考察した. 実験の結果, 従来の超仕上げに比較して加工比 (加工量/砥石損耗量) を同程度とし加工能率を大幅に向上できる特徴的な加工特性と, 実際の鏡面仕上げ実験において狙いとする加工時間の短縮が確認されたので報告する.

2. 重畳超仕上げ方法による能率的鏡面仕上げ

2-1 鏡面加工方法の検討

鏡面切削, 鏡面研削, 超仕上げやラッピングなどの鏡面加工方法を切込み t と表面粗さ (最大高さ粗さ R_z) の関係において $t \geq R_z$ と $t < R_z$ の場合に分けて考える. 図 1 (a) に示すように, $t \geq R_z$ の場合には鏡面切削 (および鏡面研削) が当てはまる. すなわち, 工具に前加工表面粗さ R_z よりも大きな切込み t を与えて前加工の表面

* 原稿受付 2008 年 10 月 20 日.

^{*1} 正員, (株)パイロットコーポレーション(☎ 254-8585 平塚市西八幡 1-4-3).^{*2} 正員, 宇都宮大学工学部(☎ 321-8585 宇都宮市陽東 7-1-2).
E-mail: t-soutome@pilot.co.jp

粗さを除去しつつ、この際に切れ刃によってあらたに創成される表面粗さを極微小にして鏡面を得ようとする方法である。振れの無い非接触型軸受けを利用した主軸に工作物を取り付けて高速切削することで工具振動が安定し、 $P_t(t) = P_{t\text{ mean}} + p_t \cdot \sin \omega t$ ($P_{t\text{ mean}}$: 背分力の静的成分, p_t : 変動成分の振幅) で表されるような背分力方向の切削力波形を工作物に作用させることが出来るようになる。このときの背分力方向工作物変位 x は一自由度のモデル化した振動系において、 $\omega \gg \omega_n$ (ω_n : 工作物振動系における角固有振動数, ω : 工具の角振動数) の場合 $x = P_{t\text{ mean}} / k_w^{(8)}$ で表されるような静止状態を示し、工具-工作物間の時間的相対変位を無くして鏡面を創成するために必要な幾何学的条件 (理論粗さを得るための幾何学的条件) を満足させることが出来るようになる。この高速切削領域における静止化現象は Grabec が提唱した二自由度非線形普通切削モデル⁽⁹⁾を発展させた振動切削系における非線形力学モデルの解析⁽¹⁰⁾からも合致する。

このような強制切込み方式による鏡面加工においては、工具と工作物の相対的な位置関係と切れ刃形状が鏡面加工精度を決定するため、目的の鏡面を得るためには主軸回転精度、工具-工作物系の剛性や送り機構精度などに対する十分な検討が必要となり、工作機械面での要求事項が多くなってくる。しかし、その反面、工作機械の精度を高めることにより鏡面を得ることと同時に形状精度の向上も期待できることになる。

図1 (b) には $t < R_z$ に該当する定加重方式による超仕上げ (およびラッピング) による鏡面加工方法を示す。この加工方法は工作物に砥石・砥粒を定加重で押し付けて各砥粒によって微小切削を行い、工作物の表面粗さを除去し終ったところで加工を終了して鏡面を得ようとする方法である。この加工方法の場合、工具と工作物が常時接触しているため工具と工作物の相対的位置関係は変わらず維持されるため、図1 (a) に示すような工具-工作物振動系における工作物挙動を考慮しなくても鏡面加工が実施できるようになる。

このように定加重方式によれば形状精度は前加工用工作機械によって決定されるため、図1 (a) に示す方法とは別に鏡面加工のみを目的として加工が実施でき、この方法による鏡面加工の実施に当たっては工作機械や加工条件に対する配慮が少なくすむようになる、極めて簡便な鏡面加工方法として考えられる。

2・2 重量超仕上げ方法について 定加重方式による鏡面加工方法の中でも本研究で対象とする単純円筒形状には固定砥粒による超仕上げが適切であると考え、この方法に振動切削機構を適用させた鏡面加工方

Fig.1 Mirror machining process

法について検討する。超仕上げにおいては、その仕上げ過程で自己コントロールされる砥石の摩耗と目づまり状況に依存する点が大きいため、それに応じた加工時間が必要になってくる。このため加工能率の向上が重要な検討課題となってくる。この加工能率の向上に関する試みは緒言に示した2, 3の研究によって報告されている。本研究ではこれらの成果に限部、著者らの研究成果を加味して、従来の超仕上げに利用されている20~50Hz程度の低周波振動による加工特性と20kHz以上の超音波振動による加工特性、それぞれの長所を利用して図2に示す新しい鏡面加工方法を考えた。すなわち、

- (1) 切削加工工程では砥粒の脱落、破碎を活発にし、砥石の切れ味を良くして加工量の増大を図る。そして、迅速に前加工表面粗さを除去して、その砥石でなし得る表面粗さに仕上げる。
- (2) 鏡面加工工程では砥石の目づまりを利用して、短時間に砥石面を平滑にして、(1)によって均一な表面粗さ形状に加工されている切削加工面を迅速に鏡面に仕上げる。

(1)のためには大粒径砥粒砥石が適合し、(2)のためには小粒径砥粒砥石が適合する。そのように一個の砥石で(1)と(2)を両立させることはできないため、どちらかに力点を置いて仕上げざるを得ない。従来の超仕上げは(1)に重きをおいて切削加工能率を重視して大粒径砥粒砥石を用い、鏡面加工時間は長くなっても止むを得ないとしているように考えられる。本研究では、超仕上げの能率向上のためには(2)に力点を置いて小粒径砥粒砥石を用い、その欠点である切削性を改善する方法を案出することにした。

(a) Cutting process (b) Mirror machining process

f,a : Ultrasonic vibration , P : Stone pressure
F,A : Vibration of low frequency

Fig.2 Superposition superfinishing process

Fig.3 Tool vibration system and work profile

さて、超音波振動を利用して砥石を工作物表面と平行で、研削方向とは直角方向に 20 kHz 以上の超音波域の高い振動数で片振幅 $10\text{ }\mu\text{m}$ 前後の振幅で超音波振動させて研削すると、(a) 相当結合度特性効果⁽¹¹⁾、

(b) 刃先鋭利化効果⁽¹²⁾, (c) 目づまり防止効果⁽¹³⁾などの諸効果が得られることが明らかになっている。すなわち, (a) は砥石に振動応力を付加することで砥粒の脱落, 破碎が本来の砥石に較べて活発になり, 見かけ上, 結合度の低い砥石の特性を示す効果を, (b) は砥粒切れ刃がジグザグ運動するため傾斜三次元切削機構となって各砥粒の有効すくい角が大きくなり切れ味がよくなる効果を, (c) は超音波洗浄作用による目づまり防止効果を意味する。これらの効果に加え, さらに砥粒の運動軌跡に着目すると, 超音波振動を付加することにより (d) 最大交差角を大きくして砥石の破碎を活発にする効果⁽¹⁴⁾や (e) 重畳振動により加工距離を大きくできる効果が期待できるものと考えられる。

以上のような諸効果によって砥石の切れ味は大幅に改善されそうであるが、その反面、切削面は常にその砥石によって得られる微細表面粗さを示し、絶対に鏡面にならない欠点がある。一方、振動数が低く振幅の大きい従来の低周波振動砥石には工作物表面の微細表面粗さを切削して、その切りくずなどによる目づまりと砥粒の摩滅を利用した平滑な砥石面による鏡面加工ができる長所がある。この両者が持っている長所を組み合わせれば、小粒径砥粒砥石を用いることができて超仕上げによる鏡面加工の能率を向上させることができるものと考えられる。

すなわち、小粒径砥粒砥石を用いて、これを 20kHz 以上の超音波域の振動数で振動させ、従来の 20~50Hz 程度の低周波振動に重畳させて切削加工を行い、その砥石で加工できる均一な微細表面粗さに切削し終わったところで、超音波振動を停止して低周波振動のみとして超仕上げを行って迅速に鏡面仕上げする方法である。本研究においてこの鏡面仕上げ方法を重畳超仕上げ方法 (SSF) と名づけることにする。

3. 重畳超仕上げ装置と実験方法

重畳超仕上げ方法による基本的特性を究明するためには低周波振動に超音波振動を重畳した仕上げ機構を詳細に検討する必要がある。本報告ではこのための検討を行う前に、まず重畳超仕上げによって得られる加工特性について、実用的立場から観察しておく必要があるように思われる。このために、本報では工作物回転数、砥石圧力、砥石粒径・結合度等を変化させた場合の加工量、砥石損耗量及び表面粗さの測定と、それらから得られる加工能率、砥石損耗率、及び加工比（加工量／砥石損耗量）を算出して従来の超仕上げと比較しながら考察することにした。

試作した超音波砥石振動系の構成と、それに関連して工作物形状と取り付け方法を図3に示す。フェライト磁歪振動子端面にジュラルミン製の振幅拡大用ホーンの大面積部を接着固定し、ホーン先端小面積部に三次の曲げ振動姿態で共振する振動砥石シャンクをねじ結合する。シャンクの両端に10mm角の超仕上げ用砥石を接着し、28kHzで共振する工具振動系を構成した。これらの接着にはいずれもエポキシ系二液接着剤を用いた。これによりフェライト磁歪振動子で発生する微小振幅は発振器出力20Wで砥石端面片振幅 $8\mu\text{m}$ 程度に拡大される。低周波振動装置の駆動源としては出力400Wの三相誘導電動機を用い、この振動軸を他方向振動成分が混在しないようにして軸方向のみに往復運動させ、振動数 F ・振幅 A をそれぞれ単独で数段

Fig.4 Experimental apparatus

階に変化させられるようにした。低周波振動軸端部にスプリング方式による砥石加圧装置を固定し、更にこの加圧装置に前記砥石振動系を保持するホークランプ用フレームを取り付けて、超音波振動砥石の振動方向が低周波振動方向と同方向となるように調整し完成させたのが図4に示す重畳超仕上げ装置である。実験はこの装置を池貝鉄工所製EC-16型旋盤の往復台上に取り付け、図3で図示した工作物ホルダーを旋盤主軸に取り付けて実施した。実験条件を表1に示す。

実験に際しては、まず工作物外周の振れが $2\mu\text{m}$ 程度となるように固定する。次に工作物外周と砥石の間に粒度#150のエメリーペーパーを挟み込み、これに実験で利用する所定の加圧力を与えて砥石を密着させ、砥石に低周波振動を与えながら工作物外周に巻きつけたエメリーペーパーと工作物を手動作で往復回転運動させて砥石のツルーイングとドレッシングを行うことにした。工作物外周の前加工表面粗さをA150砥石を用いた円筒研削によって $2.5\mu\text{m} R_z$ 程度に仕上げるようにした。実験は実験毎に切削開始から30sec, 1min, 以降7minまで1分経過毎に加工量, 表面粗さ, 砥石損耗量を測定し、加工状況に応じて測定の時間間隔を変更した。加工量はマイクロメータによって直交する2箇所の工作物直径を測定して平均値を求め、直径の減少量をもって加工量 ΔD とした。砥石損耗量の測定は図5に示すような測定器を製作し、砥石を工作物外周に密着させた状態で、砥石シャンクの基準面と工作物外周面におけるマイクロメータの初期設定値を基準に、加工による減少長さ ΔL を読み取ることにした。砥石損耗量 ΔW はこの測定値から加工量 ΔD を減じて $\Delta W = (\Delta L - \Delta D)$ とした。

Table 1 Experimental conditions

Low frequent vibration	Frequency F : 25Hz Amplitude A : 0.75mm
Ultrasonic vibration	Frequency f : 28 kHz Amplitude a : $7.5\mu\text{m}$
Pressure P	24.5, 49, 78.4, 98, 147, 196kPa
Rotational frequency N	235, 375, 600rpm
Superfinishing stone	WA (600, 800, 1000, 3000) RH (20, 30, 40, 50, 60) V
Machining fluid	Light oil
Work	Material : S45C, SKS3(HRC47) Profile :

Fig.5 Measuring device of stone wear

$$\Delta W = \Delta L - \Delta D$$

 ΔW : Stone wear

 ΔL : Measured value on micrometer

 ΔD : Stock removal value

Fig.5 Measuring device of stone wear

4. 実験結果および考察

4.1 重畳振動加工 (SVC) における加工能率, 砥石損耗率および加工比 WA3000, 結合度 RH30 の砥石を用い、低周波振動の振動数と振幅をそれぞれ $F=25\text{Hz}$, $A=0.75\text{mm}$ とし、超音波振動の振動数と振幅をそれぞれ $f=28\text{kHz}$, $a=7.5\mu\text{m}$ 、工作物回転数 $N=235\text{rpm}$, 375rpm , 600rpm とした場合の重畳振動加工 (SVC) と超仕上げ (SF) による加工量を図6に示す。

本実験での工作物回転数は従来 SF において利用されている加工速度となるように、旋盤の設定回転数を選択した。SF では、いずれの回転数の場合も加工開始後 3min 程度で砥石が目づまりを起こして加工量の増加が見られなくなり、工作物表面には光沢が観察されるようになる。一方、SVC ではいずれの回転数においても図示のような直線的増加傾向を示す。2min 経過時の加工量を SF と比較すると、およそ3倍～8倍に増大する。

前記条件における砥石損耗量の測定結果を図7に示す。SF による砥石損耗量は加工開始後 3min で $50\mu\text{m}$

Fig.6 Influence of work revolution on stock removal
SF:F=25Hz・A=0.75mm, UC:f=28kHz・a=7.5μm, SVC:SF+UC,
N=235,375,600rpm, P=98kPa, WA3000RH30, SKS3(HrC47)

Fig.7 Influence of work revolution on stone wear
SF:F=25Hz・A=0.75mm, UC:f=28kHz・a=7.5μm, SVC:SF+UC,
N=235,375,600rpm, P=98kPa, WA3000RH30, SKS3(HrC47)

Fig.8 Stone wear rate, stock removal rate
and removal ratio for wear

SF:F=25Hz・A=0.75mm, UC:f=28kHz・a=7.5μm, SVC:SF+UC,
P=98kPa, N=235,375,600rpm, WA3000RH30, SKS3(HrC47)

～70μmにとどまる。一方、SVCにおいては、いずれも曲線的に増加傾向を示す。235rpmにおいては特に大

きな摩耗量を示し、2min経過時にはSFの9倍に増大して615μmを示す。

図6、図7の各回転数における2min経過時の加工量、砥石損耗量から単位時間(min)あたりの加工量(μm)と砥石損耗量(μm)を読み取って、回転数と加工能率、砥石損耗率および加工比 G {加工体積 V (mm³)/砥石損耗体積 W (mm³)}との関係を図8に示す。図においてSFによる加工能率と砥石損耗率にはあまり変化が見られない。一方、SVCによる加工能率は回転数の増加に伴って増加傾向を示す。砥石損耗率は235rpmにおいて307.5μm/minと大きな値を示すが、375rpm、600rpmでは約140μm/minに低下する。235rpmにおいては砥石に超音波振動を与えることで過剰な砥石砥粒の脱落、破砕が促進されているものと推測される。

以上のようにSVCによると、高い加工能率を示す一方で砥石損耗率も高くなるため、実用の際には加工比の大きさが重要となってくる。図中、加工能率と砥石損耗率から各回転数における加工比を求めて図中棒グラフによって示した。SFにおける加工比は375rpmにおいて最大値0.33、600rpmにおいて最小値0.22を示す。SVCでは回転数の増大に伴い増加傾向を示し、600rpmにおいて0.31に達するが、235rpmにおいては砥粒運動軌跡に起因した現象と思われる過剰な砥石損耗により0.1の低い加工比を示す。加工初期を除いた3～4min間の加工比は0.27～0.81である。

本報告での実験条件におけるSF、SVC両加工の加工比において傾向の違いは見られるが、ほぼ同程度の値として捉えられる。このようにSVCにおいて、加工比をSFと同程度にして加工能率を大幅に高められる実用上有用な現象が観察される。

4・2 重畳振動加工(SVC)による表面粗さ 工作物回転数 $N=375$ rpmと一定にし、各加工方法による表面粗さ線図を図9に示す。前加工による表面粗さ $2.3\mu\text{m}R_z$ の工作物を利用して、時間的変化を測定、観察した。無振動加工(NVC)においてはあまり除去量を得ないまま早期に目づまり現象が観察される。SFにおいては砥石が徐々に目づまりを起こして表面粗さは加工開始後5minで $0.2\mu\text{m}R_z$ の表面粗さに達する。UCでは砥石の目づまりはあまり観察されず、短時間に表面粗さは小さくなるが $1.7\mu\text{m}R_z$ にとどまる。SVCでは加工開始後1minで約 $1\mu\text{m}R_z$ に減少する。短時間に前加工表面粗さを除去してその砥石によって得られる微細表面粗さに到達し、UCによる表面粗さよりも小さな粗さを示す。超音波振動砥石に低周波振動を重ねさせることでUCにおける表面粗さを更に平滑化改善

Fig.9 Surface roughness

SF:F=25Hz・A=0.75mm, UC:f=28kHz・a=7.5μm, SVC:SF+UC, N=375rpm, P=98kPa, WA3000RH40, SKS(HrC47)

し、常時微細な加工表面としながらも加工を促進できることを示している。この特徴は前加工表面粗さを除去し終わったところで SF の特性を利用して短時間に鏡面仕上げしようとする重畳超仕上げ方法 (SSF) の狙いに効果的な現象を示している。

以降の考察にあたり、各加工方法の記述を簡略化して、重畳超仕上げ (SSF)、従来の超仕上げ (SF)、超音波振動加工 (UC)、重畳振動加工 (SVC=UC+SF)、無振動加工 (NVC) として、() 内の略称を用いて記述することにする。

4・3 砥石圧力が加工量、加工能率に及ぼす影響

図 10 に工作物回転数を $N=375\text{rpm}$ と一定にし、砥石圧力を $P=24.5\sim 196\text{kPa}$ と変化させた場合の加工量を示す。SF による加工量は砥石圧力の増加に伴い増加傾向を示し、 $P=196\text{kPa}$ とすることで急激に増大する。 $P=147\text{kPa}$ 以下では加工開始後 2～3min 程度で砥石の目づまり現象を呈しそれ以降は加工量の増加が見られない。SVC では $P=78.4\text{kPa}$ 以下において、3min 程度で砥石の目づまり傾向を示すが $P=98\text{kPa}$ 以上の砥石圧力においては砥石の目づまりは観察されず、加工量は直線的な増加傾向を示す。

図 10 における加工開始から 2min 経過時の加工量を読み取り、砥石圧力と加工能率の関係を図 11 に示す。前述のように SF、SVC 両加工において、加圧の上昇に伴って加工能率は増加する。砥石圧力 $P=78.4\text{kPa}$ における SVC の加工能率は SF に比べて 5 倍大きな値を示すが、 $P=196\text{kPa}$ においては 1.7 倍に減少し、加工能率の増加比率は圧力の増加に伴い減少傾向を示す。砥石の目づまり現象を伴う加工量の測定においては、加工開始後の測定タイミングによって加工能率の値が異なることになるため、本報告では加工初期のばらつきは含まれることにはなるが、砥石に目づまりが発生して加工が停止する以前の加工量を捉えて加工能率を比較することにした。

Fig.10 Influence of pressure on stock removal
SF:F=25Hz・A=0.75mm, UC:f=28kHz・a=7.5μm, SVC: SF+UC, N=375rpm, WA3000RH30, SKS3(HrC47), P=24.5～196kPa

Fig.11 Relation between pressure and stock removal rate

SF:F=25Hz・A=0.75mm, UC:f=28kHz・a=7.5μm, SVC: SF+UC, N=375rpm, WA3000RH30, SKS3(HrC47), P=24.5～196kPa

4・4 砥石粒径・結合度が加工量に及ぼす影響

工作物回転数を $N=375\text{rpm}$ 、砥石圧力 $P=98\text{kPa}$ とし、砥石結合度 RH20、粒度 #600、#800、#1000、#3000 の砥石を用いた。工作物は種々行った予備実験において、粒度による違いが顕著に見られた炭素鋼材 S45C を用いることにした。図 12 に加工開始から 40sec 後の加工量を示す。SF、SVC 両加工における加工量は砥石粒径を大きくするに伴って増加傾向を示し、ばらつきは見られるがほぼ同程度の傾きを持った線図を示す。ここで砥石粒径と超音波振動振幅に着目し、たとえば #3000 砥石を用いた SVC による加工量とこの砥石平均粒径 $5\mu\text{m}$ に振動振幅 $15\mu\text{m}$ を加算して、これに匹敵する粒径 $20\mu\text{m}$ の #800 砥石を用いた SF による加工量を比較してみると図中補助線 A-B が示すよう

Fig. 12 Relation between stock removal and grain size

SF: $F=25\text{Hz}$, $A=0.75\text{mm}$, UC: $f=28\text{kHz}$, $a=7.5\mu\text{m}$, SVC: SF+UC, $P=98\text{kPa}$, $N=375\text{rpm}$, S45C, WA(600, 800, 1000, 3000)RH20

Fig. 13 Relation between stock removal and stone grade

SF: $F=25\text{Hz}$, $A=0.75\text{mm}$, UC: $f=28\text{kHz}$, $a=7.5\mu\text{m}$, SVC: SF+UC, $N=375\text{rpm}$, $P=98\text{kPa}$, SKS3(HrC47), WA3000(RH20, 30, 40, 50, 60)

Fig. 14 Superposition superfinishing (SSF)

SF: $F=25\text{Hz}$, $A=0.75\text{mm}$, UC: $f=28\text{kHz}$, $a=7.5\mu\text{m}$, SVC: UC+SF, $P=98\text{kPa}$, $N=375\text{rpm}$, WA3000RH30, SKS3(HrC47)

におおよそ同量の加工量を示す。

このように SF 砥石に超音波振動を重畳させることで見かけ上その砥石の粒径 d に振幅 $2a$ を加えた、 $(d+2a)$ の砥石粒径に匹敵する SF 砥石による加工量を示すような現象が観察される。本研究においてこのような現象を捉えて「大粒径化効果」と名づけることにした。

図 13 に SF, SVC 両加工における砥石結合度と加工

量の関係を示す。加工開始後 1min の加工量をプロットした。両者とも砥石結合度を高めると加工量は減少傾向を示し、SVC では SF に較べて 1.4~2.7 倍の加工量を示す。図中、例えば加工量 $4\mu\text{m}$ に補助線を引くと、A-B が示すように SF による RH30 砥石は SVC による RH60 砥石に相当することを示す。砥石に超音波振動を付加することで見かけ上の砥石結合度を低下させる効果、すなわち、隈部が報告している相当結合度特性効果⁽¹⁾が観察される。

4・5 重畳超仕上げ (SSF) による鏡面加工 これまでの実験結果及び考察から、従来の超仕上げ砥石に超音波振動を重畳させることで、その切削加工工程において加工量を増大させることができるため、狙いとする鏡面仕上げに適した小粒径砥粒砥石を用い迅速に鏡面仕上げできることがわかった。

実際に SSF によってどの程度加工時間が短縮されるのかを確かめるために、最終的に鏡面を得ることを目的とした実験を行い、加工時間に対する表面粗さの関係を求めてみた。工作物として外径 $\phi 40\text{mm}$ 、全長 40mm の合金工具鋼 SKS3 (HrC47) を用い、砥石として WA3000RH30 を用いた場合の実験結果を図 14 に示す。図中○印は振動数 $F=25\text{Hz}$ ・振幅 $A=0.75\text{mm}$ の低周波振動のみの SF を示す。●印は加工開始後 10sec 間だけ超音波振動数 $f=28\text{kHz}$ ・振幅 $a=7.5\mu\text{m}$ を重畳させた ($28\text{kHz}+25\text{Hz}$) SVC 加工を行い、それ以降は (25Hz) SF のみとする SSF による表面粗さ線図を示す。10sec の SVC によって前加工による表面粗さ $2.3\mu\text{m Rz}$ を $0.7\mu\text{m Rz}$ 程度に粗仕上げし、それ以降の SF により表面粗さを $0.2\mu\text{m Rz}$ に減少できることがわかる。SF においては、10sec 経過時の表面粗さは $1.3\mu\text{m Rz}$ を示し、120sec 経過時の表面粗さは $0.5\mu\text{m Rz}$ にとどまる。切削加工工程とは異なり鏡面加工工程において表面粗さを小さくするためにはかなりの時間を必要とする。したがって切削加工工程において極力微細な表面凹凸に仕上げておく必要がある。SVC によって切削表面粗さを小さくできるため、SSF による最終表面粗さをさらに小さくできる可能性がある。図 14 から SF, SSF 両加工において、たとえば $0.5\mu\text{m Rz}$ に到達する時間を読み取って比較してみると SSF によって約 $1/8$ に短縮されることになる。図 14 中にこの実験によって鏡面加工された工作物の写真を参考に示す。工作物面のだれや光沢むらのない高品位の鏡面が得られている。

5. 結 言

本研究において、低周波振動 (SF) と超音波振動

(UC)をうまく使い分けて能率的に鏡面仕上げを行う重畳超仕上げ方法 (SSF) を創案した。本報告における実験結果から以下のことがわかった。

(1) 工作物回転数を 235~600rpm と変化した実験から重畳振動加工 (SVC) による加工能率と砥石損耗率は従来の超仕上げ (SF) に比較してそれぞれ 3.2 倍~8 倍, 4.1 倍~9.6 倍に増加する。これから得られる加工比は SF とほぼ同程度であることから重畳超仕上げ方法 (SSF) は充分実用に供しえることがわかった。

(2) 砥石圧力 P を 24.5~196kPa と変化した実験から, SVC による加工能率は SF に比べ 1.7~5 倍に増加し, その増加比率は加圧力の増加に伴い減少する。

(3) SF 砥粒砥石に超音波振動 (UC) を付加した SVC による加工量は使用した砥石粒径 d に超音波振動振幅 $2a$ を加えた粒径 $(d+2a)$ 砥石を用いて超仕上げ (SF) したときに得られる加工量におおよそ近似できるような大砥粒径化効果と, 見かけ上の砥石結合度を低くできるような効果があることがわかった。

(4) (1)~(3) の結果に基づき, 実際に鏡面仕上げを目的に小粒径砥粒砥石を用いて SSF 実験を行った結果, SF に比較して加工時間を約 1/8 に短縮できることがわかった。

以上, 本報告において SSF における概略加工特性を記述したが, 重畳振動砥石砥粒による運動機構の解析と考察は次報で報告したいと考えている。

本研究を進めるに当たり, 終始ご指導を戴いた故京都宮大学隈部淳一郎教授と実験の協力を戴いた当時学生の高成徹, 野原茂, 笹井康直, 志茂浩志 各氏にお礼を申し上げます。

文 献

- (1) Siozaki, S. and Kato, C., On the Fine Finishing by the High Frequent Abrasive Stone, *The Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 20, No. 98 (1954), p. 640.
- (2) Tanaka, Y. and Yano, A., Study on the Fine Finishing by an Ultrasonically Vibrated Abrasive Stone. (1st Report), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 29, No. 3 (1963), pp. 232-240.
- (3) Kumabe, J. and Soutome, T., Study on Superposition Superfinishing, *Proceedings of the 60th Annual Meeting of the Japan Society of Mechanical Engineers*, No. 820-16 (1982), pp. 68-70.
- (4) Kumabe, J., Soutome, T. and Nishimoto, Y., Ultrasonic Superposition Vibration Cutting of Ceramics, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 52, No. 11 (1986), pp. 1851-1857.
- (5) Jin, M., Ogasawara, K. and Murakawa, M., Study on Ultrasonic Superposition Grinding, *Proceedings of 1997 Year Autumn Meeting of the Japan Society for Precision Engineering* (1997), p. 404.
- (6) Soutome, T., Yokoi, F. and Kumabe, J., Fine finishing by Superposition Vibration Handstone, *Proceedings of the 1984 Year Spring Meeting of the Japan Society for Precision Engineering* (1984), pp. 27-30.
- (7) Kumabe, J., Hirai, S. and Soutome, T., Super Precision Cylindrical Machining by Vibration Cutting, *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 53, No. 11 (1987), pp. 1752-1757.
- (8) Kumabe, J., *Fundamentals and Application of Vibration Cutting*, Jikkyo Publishing Co. Ltd., Japan (1979), p. 82.
- (9) Grabec, I., *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, 4-1, 2 (1988), 129-134.
- (10) Karube, S., Soutome, T. and Sato, K., Dynamic Model for Vibration Cutting, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C*, Vol. 63, No. 609 (1997), p. 1464.
- (11) Kumabe, J. and Sakaguchi, K., Equivalent Grade of Characteristics of the Vibrating Grinding Wheel, *The Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 37, No. 9 (1971), pp. 629-635.
- (12) Kumabe, J., Study on Ultrasonic Internal Grinding by Using the Longitudinally Vibrated Grinding Wheel (1st Report), *The Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 27, No. 181 (1961), pp. 1404-1411.
- (13) Tanaka, Y., Tsuwa, H. and Yano, A., Study on the Fine Finishing by an Ultrasonically Vibrated Abrasive Stone (3rd Report), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 31, No. 4 (1965), pp. 307-311.
- (14) Asaeda, T., Research on Superfinishing, *Research Laboratory for Precision machinery*, Tokyo Institute of technology (1950), pp. 35-38.