重畳超仕上げに関する研究*

(第3報, 重畳振動砥石の損耗現象)

早乙女 辰男^{*1}, 佐藤 啓仁^{*2}Study on Superposition Superfinishing
(3rd Report, Ware Phenomenon on Superposition Vibrated Stone)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 process with using ultrasonic and low frequent vibrations, that has been named "superposition superfinishing (SSF process)". In the first report, it was confirmed that a stock removal rate of superposition vibration cutting as cutting process on this SSF process can be higher than that of low frequent superfinishing, and that a high efficient mirror machining can be practically achieved. In the second report, by analysis and consideration on superposition cutting track, it was found that cutting length of this superposition vibration cutting strongly influence on a stock removal amount. In this report, as one reason of obtaining a high stock removal rate, we have adopt equivalent grade characteristics of ultrasonically vibrated abrasive stone. It has been shown that the grade of abrasive stone decreases according as amplitude increases. On the result of some experiments, it is found that this phenomenon can be controlled by an amplitude value of ultrasonic vibration, and that a rate of abrasive stone ware per one meter of superposition superfinishing is lower than that of low frequent superfinishing in the case of large maximum cross angle.

Key Words: Superposition Superfinishing, Mirror Machining, High Efficiency, Equivalent Grade Characteristics, Fine Abrasive Stone, Maximum Cross Angle

1. 緒 言

本研究の目的は超仕上げを利用して簡便かつ能率的鏡面仕上げ方法を究明することである。このための一方法として重畳超仕上げ法(SSF仕上げ法: Superposition superfinishing)を創案した。鏡面仕上げに適した小粒径砥粒砥石を用い,これに与える20~50 Hz程度の低周波振動と20 kHz以上の超音波振動をうまく使い分けて迅速に鏡面仕上げを行なう方法である。

第1報⁽¹⁾では重畳超仕上げの切削加工工程(重畳振動仕上げ: SVC process)において加工能率が向上し,目的とする鏡面仕上げ時間を短縮できることを示した。

第2報⁽²⁾では重畳振動仕上げにおいて加工能率が向上する要因の一つとして加工長さに着目し,重畳振動砥粒運動軌跡の解析を行った。そしてその実験的考察から重畳振動仕上げではおおそ加工長さに依存し

て高い加工能率を示すことがわかった。

本報告では前報での結果をもたらす複合的要因として砥石特性の視点から考察することにした。すなわち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くできる相当結合度特性⁽³⁾と砥粒の運動軌跡に起因した脱落と破砕性に着目し,種々加工条件を変化させた重畳振動仕上げ実験により諸条件が砥石損耗量に及ぼす影響を考察したので報告する。

2. 重畳振動仕上げによる
砥粒の脱落と破砕について

図1に重畳超仕上げ方法(SSF仕上げ法)を示す。この方法は(a)図に示す切削加工工程(SVC process)においては20~50 Hz程度の低周波振動に20 kHz以上の超音波振動を重畳し,砥石の切れ味をよくして加工能率を向上させ,(b)図に示す鏡面仕上げ工程では低周波振動のみの超仕上げ(SF process)によって迅速に鏡面仕上げを行なう方法である。鏡面仕上げに適した小粒径砥粒砥石を用い切削加工能率を向上させるのが狙いである。超仕上げ工程を二段階に切り替えて鏡面を得ようとする試みは二段超仕上げ⁽⁴⁾に類似する。

* 原稿受付 2009年9月7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

周知のように砥石の特性は砥粒、粒度、結合剤、結合度、組織によって決定され⁽⁵⁾、仕上げの際には砥粒の破碎性と脱着性などの適正な砥石特性が求められる。そのように砥石損耗量に影響を及ぼす要因として、砥石に超音波振動を付加した場合の見かけ上の砥石結合度と砥粒運動軌跡によって決定される最大交差角⁽⁶⁾に着目される。

重畳振動仕上げ(SVC: Superposition vibration cutting)の砥粒運動軌跡において低周波振動の振動数、振幅をそれぞれ F, A 、超音波振動の振動数、振幅をそれぞれ f, a 、工作物回転数 N 、工作物直径 D とすると、最大交差角は $\theta = \tan^{-1} [120(AF + af)/DN]$ ⁽²⁾ で表され、例えば、これまでの実験で利用している $N = 375 \text{ min}^{-1}$ 、 $F = 25 \text{ Hz}$ 、 $A = 0.75 \text{ mm}$ 、 $f = 28 \text{ kHz}$ 、 $a = 7.5 \mu\text{m}$ として最大交差角 θ を求めると、従来の低周波振動による超仕上げの $\theta = 10^\circ$ が $\theta = 64^\circ$ に増大し、浅枝の報告⁽⁶⁾ のように砥粒の脱落と破碎の機会が増えて常時鋭利な砥粒切れ刃が維持される。さらに低周波振動を利用した超仕上げ(SF)に比較して1000倍(28 kHz/25 Hz)以上振動数を高められることから、その振動数に応じて、より砥粒破碎が促進されるものと考えられる。

砥石の結合度に着目した損耗現象に関しては、隈部の研究⁽³⁾があり、超音波振動砥石の内部応力に起因して砥粒の脱落が促進されることが報告されている。この現象は見かけ上の砥石結合度を低下させるものであり、砥石に与える超音波振動の振幅を変化させることで1個の砥石で適正な砥石結合度に調整出来ることを示している。本研究で用いる超仕上げ砥石においても有用な特性であると考えられる。

ここで加工の際の砥石損耗現象は最大交差角と砥石

結合度の両因子が複合された結果として現れるため、以降で記述する相当結合度特性はこの両現象を含めた特性として捉えることにする。

3. 超音波振動砥石の相当結合度特性

3・1 実験装置および実験方法 砥石結合度の測定方法には、ドライバー法やボール押し込み法⁽⁷⁾、機械的二又ビット法⁽⁸⁾、衝撃試験機による測定法⁽⁹⁾や設定切り込みによる切削抵抗を求める方法⁽³⁾などがあるが、本報告ではダイヤモンドドレッサを用いた定荷重切削方式による切削溝深さを指標にして砥石結合度を求めることにした。図2にこのための測定方法および超音波砥石振動系と実験装置を示す。(a)図に磁歪振動子を駆動源とする28 kHz 超音波砥石振動系と溝深さの測定方法を示す。振動子で発生する微小振幅を振幅拡大用ホーンによって伝達・拡大し、ホーン先端部に三次の曲げ振動で共振する砥石振動シャングを取り付けてシャング両端にエポキシ系接着剤によって固定された10 mm 角の砥石を超音波振動できるようにした。ダイヤモンド平やすりによって平滑に仕上げた砥石表面にダイヤモンドドレッサを定荷重 P で押し

(a) Ultrasonic stone vibration system

(a) Cutting process (b) Mirror machining process

Fig.1 Superposition superfinishing (f, a : Ultrasonic vibration, P : Stone pressure, F, A : Low frequent vibration)

(b) Experimental apparatus

Fig.2 Measuring of groove cutting method

付けて砥石表面を切削し、これによって得られる溝深さ h を測定して砥石結合度を評価することにした。実験装置を (b) 図に示す。超音波砥石振動系をボール盤のバイス上に取り付けダイヤモンドドレッサを取り付けた加圧装置をボール盤主軸のチャック部に固定する。加圧力はこの摺動部上端にワイヤーを結び滑車を介してドレッサ摺動部重量を軽減させる方向に分銅を取り付けられるようにした。この分銅を交換することでドレッサの荷重を調節する。

ダイヤモンドドレッサは頂角 90° 、先端半径 $R0.1$ の円錐型のものを利用した。切削送りはボール盤の駆動ベルトを取り外して自由に回転できるようにし、手動回転によって送りを与える簡易的な実験を行なうことにした。実験条件を表1に示す。送り速度 S は砥石振動方向と直角方向に、おおよそ $S=240$ mm/min である。以上の装置により切削実験を行った後に、切削溝深さ h を表面粗さ計によって測定する。

3.2 相当結合度の求め方 切削溝深さを指標にした評価方法を次のように考える。すなわち、溝深さ h と一般に砥石結合度表示に利用されている RH は指数関数的な関係にあるのではないかと考え、その予備実験において、各結合度の砥石を無振動状態で切削し、その溝深さを測定してこれらの関係を両対数グラフ上にプロットしてみたところ測定値にばらつきは見られるが図3に示すように h と RH には直線的な関

Table 1 Experimental conditions

Frequency f	28 kHz
Amplitude a^{0-P}	0~11 μm
Load P	0.59 N
Feed rate S	240 mm/min
Superfinishing stone	WA3000RH(20~80)V
Machining fluid	Dry

Fig. 3 Relation between stone grade RH and height of groove h [$P=0.59$ N, WA 3000 RH (20~80), $S=240$ mm/min]

係が得られる。さらにこの直線はドレッサの荷重を変えることで対数グラフ上を平行移動することも確認された。この結果から、実際に超音波振動時の相当結合度特性を求める実験においてはこの $RH-h$ 直線を利用して実験によって得られる溝深さ h から砥石結合度 RH を求めることにした。

3.3 相当結合度 前節において説明した結合度の求め方に従い砥石振幅を変化して得られる切削溝深さから結合度を求め、WA3000RH (20, 40, 60) の砥石について砥石振幅に対する結合度の変化をまとめた結果を図4に示す。これまでの研究報告⁽³⁾を参考に結合度 RH を砥石振幅 a の指数関数として表すと振幅の小さい範囲において実験値との乖離が見られるため、指数を a のべき関数として表すことにした。結合度の大きい砥石ほど超音波振動振幅の変化に伴い変化の大きい線図を示す。RH60 の場合 $RH=60e^{-0.34a^{0.56}}$ の実験式によって表され、砥石の振幅を $a=7$ μm とすると RH22 程度の砥石に相当して低下するのがわかる。この線図は砥石振幅に対する砥石結合度の変化の様子を知る上で参考になるものと考えている。

このように結合度が指数関数的に低下する現象は本報告での記述を省略するが砥石粒度を #1000, #800, #600 と変化させた実験においても確認される。さらに #3000 砥石を用い 1 min 間、振幅 $a=11$ μm の超音波振動を与えた実験を行なって結合度特性が可逆的であることも確認した。

以上の簡易的な実験により超音波振動砥石の振動振幅 a を大きくすることで見かけ上の砥石結合度が低下することを示したが、厳密には超音波振動を付加したことによる砥石内部応力に起因した砥石結合度の低下に、衝撃力による砥粒の脱落と破碎現象も加わって複合的に結合度特性を示しているものと考えられる。

Fig. 4 Relation between amplitude and stone grade RH [$P=0.59$ N, WA 3000 RH (20, 40, 60), $S=240$ mm/s]

Table 2 Experimental conditions

Superposition superfinishing		Work
Frequency F	0 ~ 25 Hz	Material : SKS3(HrC47) Profile :
f	0 ~ 46k Hz	
Amplitude A^{OP}	0 ~ 1 mm	
a^{OP}	0 ~ 7.5 μm	
Pressure P	24.5 ~ 98 kPa	
Rotational frequency N	60 ~ 950 min^{-1}	
Superfinishing stone	WA(600~3000) RH(20~80) V	
Machining fluid	Light oil

Fig. 5 Experimental apparatus

4. 重畳超仕上げ実験装置と実験条件

図5に既報でも用いた実験装置を示す。重畳超仕上げ装置を池貝鉄工所製 EC-16 型旋盤の往復台上に取り付け、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た。さらに、この装置に 20 kHz, 28 kHz, 46 kHz の3種の超音波砥石振動系を取り付けられるようにした。実験条件を表2に示す。実験では各条件を個別に変化させて行なうが、その際に $N=375 \text{ min}^{-1}$, $P=98 \text{ kPa}$, 低周波振動数 $F=25 \text{ Hz}$, 振幅 $A=0.75 \text{ mm}$, 超音波振動数 $f=28 \text{ kHz}$, 振幅 $a=7.5 \mu\text{m}$, WA3000RH40 砥石を固定条件とした。超仕上げ砥石は不二製砥製砥石を用いた。

砥石損耗量 ΔW の測定には図6の測定器を用いた。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の設定値を規準にして測定値の変化量 ΔL を読み取り、この値から工作物直径の減少量 ΔD を減じて $\Delta W = \Delta L - \Delta D$ とした。加工量 ΔD は直交する2箇所の工作物直径をマイクロメータによって測定して平均値を算出し、加工前の測定値と比較してその減少量をもって加工量とした。

Fig. 6 Measuring device of stone wear

Fig. 7 Influence of stone grade RH on stone wear rate WM [SF : $F=25 \text{ Hz}$, $A=0.75 \text{ mm}$, UC : $f=28 \text{ kHz}$, $a=7.5 \mu\text{m}$, SVC = SF + UC, $N=375 \text{ min}^{-1}$, WA 3000 RH (20~80) $P=98 \text{ kPa}$, SKS 3(HrC 47)]

5. 実験結果および考察

5.1 砥石結合度・粒度が砥石損耗量に及ぼす影響

粒度 #3000 砥石を用い、結合度を RH20, RH40, RH60, RH80 と変化させた場合の砥石結合度と砥石損耗量との関係を図7に示す。砥石損耗量は加工開始後 2 min 時の測定値から単位時間あたり損耗量 [$\mu\text{m}/\text{min}$] を読み取り、図3と同じように両対数グラフにプロットした。図中、重畳振動仕上げ(SVC)による砥石損耗量は従来の低周波振動による超仕上げ(SF)に対し 1.3 倍(RH20)~8.8 倍(RH60)に増加する。超仕上げ(SF)の各点を点線で示す補助直線によって結ぶと図中のように示される。RH80 の SF 砥石に超音波振動を付加すると補助線上の A 点が示すようにおおよそ結合度 RH35 の砥石に相当することがわかる。この補助線は後述の 5.3 節において結合度を求める際に利用する。

結合度 RH40 の砥石を用い、砥石粒度を #600, #800, #1000, #3000 と変化させた場合の砥石粒度と損

Fig. 8 Relation between abrasive grain size and stone wear rate WM [SF: $F=25$ Hz, $A=0.75$ mm, UC: $f=28$ kHz, $a=7.5$ μ m, SVC=SF+UC, $N=375$ min $^{-1}$, WA (600~3000) RH 40, $P=98$ kPa, SKS 3 (H_RC 47)]

耗量との関係を図8に示す。加工開始30 sec経過時の測定量を示した。重畳振動仕上げ(SVC)による損耗量は超仕上げ(SF)に比べ1.4倍(#800)~5倍(#3000)に増加する。SF, SVCとも#800~#3000の範囲では粒度の低下に伴って損耗量は増加を示すが#600砥石においては減少する。同じ結合度表示の砥石においても粒度によって砥石の組成が異なるため砥粒の脱落、破碎現象が異なるものと考えられる。

重畳超仕上げ(SSF)=重畳振動仕上げ(SVC)+超仕上げ(SF)の順次加工, SVC=SF+超音波振動仕上げ(UC)の同時加工を示し、以降の考察では簡略化して()内の記号を用いて記述することにする。

5・2 超音波振動速度が砥石損耗量に及ぼす影響

$a=3$ μ mと固定して $f=0$ kHz, 20 kHz, 28 kHz, 46 kHzとした場合と, $f=28$ kHzと固定して $a=0$ μ m, 3 μ m, 5 μ m, 7.5 μ mとした場合の砥石損耗量を図9に示す。図において砥石振動速度と砥石損耗量の関係を見るために $af(=a \times f$ [mm/s])を便宜的に最大振動速度として記述する。 $af=138\sim 210$ mm/sにおいて最大振動速度による違いが明瞭に観察されないが、最大振動速度を大きくすることでおよそ摩耗量も増大するものと考えられる。 $af=210$ mm/s($a=7.5$ μ m, $f=28$ kHz)における加工開始2 min後の砥石損耗量は $af=0$ のSFに比較して8.8倍に増大する。

5・3 超音波振動速度と相当結合度特性 図9における2 min時の砥石損耗量から単位時間あたり損耗量を読み取り、最大振動速度 af [mm/s]と損耗率 WM [μ m/min], および見かけ上の砥石結合度 RH との関係を図10に示す。 af に対する図中の損耗率から図7に示した補助線を利用して RH を求め、最大振動速度 af との関係を実験式によって近似すると、 RH

Fig. 9 Influence of stone vibration speed af on stone wear ΔW [SVC=SF+UC, SF: $F=25$ Hz, $A=0.75$ mm, UC: $f=0\sim 46$ kHz ($a=3$ μ m), $a=0\sim 7.5$ μ m ($f=28$ kHz), $N=375$ min $^{-1}$, WA 3000 RH 40, $P=98$ kPa, SKS 3 (H_RC 47)]

Fig. 10 Relation between stone vibration speed af and stone wear rate WM , grade RH [SVC=SF+UC, SF: $F=25$ Hz, $A=0.75$ mm, UC: $f=0\sim 46$ kHz ($a=3$ μ m), $a=0\sim 7.5$ μ m ($f=28$ kHz), $N=375$ min $^{-1}$, WA 3000 RH 40, $P=98$ kPa, SKS 3 (H_RC 47)]

$=40e^{-0.09(af)^{0.37}}$ で表される。この結果に $f=28$ kHzを代入すると $RH=40e^{-0.31a^{0.37}}$ が得られ、図4で示した $RH=40e^{-0.33a^{0.54}}$ に比較的近い傾向の線図を示す。図4および図10に示した線図における厳密な関係について未検討であるが、図4で示した結果は実際の重畳超仕上げにおいても結合度の評価指標として利用できることを示している。

5・4 砥石圧力が砥石損耗量に及ぼす影響

WA3000RH40の砥石を用い、 $P=24.5\sim 196$ kPaと変化させた場合の加工開始1 min後の砥石損耗量を図11に示す。図においてSVCによる砥石損耗量はSFに比べ2倍(49 kPa)~5.6倍(196 kPa)に増加する。SFによる損耗量は砥石圧力の増加に伴い直線的に増加する現象を示して変化点は見られないが、

Fig. 11 Relation between stone pressure P and stone wear rate WM [SVC=SF+UC, SF: $F=25$ Hz, $A=0.75$ mm, UC: $f=28$ kHz, $a=7.5$ μ m, $N=375$ min $^{-1}$, WA 3000 RH 40, $P=24.5\sim198$ kPa, SKS 3 (HRC 47)]

SVCにおいては図中補助線の交点Bが示すように、緩慢な変化ではあるが、おおよそ $P=100$ kPa 近辺において砥石損耗量が増加する臨界圧力点⁽¹⁰⁾が確認される。 $P=100$ kPa 以上の SVC による砥石表面は超音波洗浄作用と砥粒の活発な破碎と脱落も手伝って SF の場合と異なりややくすんだ黒さを示すのが観察される。

このように砥石に超音波振動を付加することで見かけ上の結合度を低下させ、臨界圧力を低下させていることが損耗量と砥石表面の観察から確認される。

5.5 工作物回転数が砥石損耗量に及ぼす影響

$N=60\sim950$ min $^{-1}$ と変化した場合の砥石損耗量を図 12 に示す。SF においては、回転数を高めるに伴い損耗量は減少する傾向を示し、235 min $^{-1}$ 以上の回転数においては 2 min 以降損耗量はあまり増加しない。SVC においては 95 min $^{-1}$ において逆転現象が見られるが回転数を高めることで損耗量も増加する傾向を示し、2 min 経過時の損耗量を回転数毎に SF と比べると約 1.8 倍 (95 min $^{-1}$) $\sim$ 60 倍 (950 min $^{-1}$) に増加する。第 1 報においては結合度の低い砥石 (RH 30) を用いているが本実験結果よりも総体的に少ない損耗量を示し、また $N=375$ min $^{-1}$, 600 min $^{-1}$ に比較し $N=235$ min $^{-1}$ において際立って大きな損耗量を示す結果を得ている⁽¹⁾。異なる砥石製造メーカーによる組織の違いなどにより、最大交差角の影響も受けて砥粒の脱落と破碎現象が異なる結果によるものと考えられる。本実験では一貫して同一製造メーカーの砥石を利用しているため、諸条件に対する現象を観察する上で問題は無いものと考えている。

5.6 低周波振動速度が砥石損耗量に及ぼす影響

$F=25$ Hz と固定して $A=0$ mm, 0.25 mm, 0.5 mm,

Fig. 12 Influence of rotational frequency N on stone wear ΔW [SF: $F=25$ Hz, $A=0.75$ mm, UC: $f=28$ kHz, $a=7.5$ μ m, SVC=SF+UC, $N=60\sim950$ min $^{-1}$, WA 3000 RH 40, $P=98$ kPa, SKS 3 (HRC 47)]

0.75 mm, 1 mm と変化した場合と、 $A=0.75$ mm と固定して $F=0$ Hz, 12.5 Hz, 25 Hz と変化した場合の砥石損耗量を図 13 に示す。振動数に関しては高振幅時において装置の振動により実験結果にばらつきが生じるため 25 Hz にとどめた。図において低周波最大振動速度 AF と砥石損耗量の関係を見るために $AF(=A \times F[\text{mm/s}])$ を便宜的に最大振動速度として記述する。SF では振動速度 AF を高めるに伴い、砥石損耗量も増加する現象が観察される。SVC でも最大振動速度の増加に伴って一部逆転する現象が観察されるが増加傾向を示す。加工開始 2 min 後における SVC の損耗量は SF に比較して 3 倍 ($AF=0$ mm/s) $\sim$ 10 倍 ($AF=9.375$ mm/s) に増大する。

5.7 最大交差角が単位加工長さあたり砥石損耗率と加工比に及ぼす影響 本節では最大交差角 θ と単位加工長さあたり砥石損耗率 RL [μ m/m] および加工比 G との関係について考察する。図 9, 図 12, 図 13 において、それぞれ加工開始後 2 min 時の砥石損耗量から単位時間あたり損耗量 [μ m/min] を読み取り、これを砥粒平均切削速度 [m/min] で除して単位加工長さあたり損耗率 RL [μ m/m] を求めて最大交差角 θ との関係を示したのが図 14 である。これらの算出においては、第 2 報で求めた平均切削速度⁽²⁾と最大

Fig. 13 Influence of stone vibration speed AF on stone ware ΔW [SF: $F=0\sim 25$ Hz ($A=0.75$ mm), $A=0\sim 1$ mm ($F=25$ Hz), UC: $f=28$ kHz, $a=7.5$ μ m, SVC=SF+UC, $N=375$ min $^{-1}$, WA 3000 RH 40, $P=98$ kPa, SKS 3 (HRC 47)]

Fig. 14 Relation between maximum cross angle Θ and rate of stone ware RL [SF: $F=0\sim 25$ Hz ($A=0.75$ mm), $A=0\sim 1$ mm ($F=25$ Hz), UC: $f=0\sim 46$ kHz ($a=3$ μ m), $a=0\sim 7.5$ μ m ($f=28$ kHz), SVC=SF+UC, $N=60\sim 950$ min $^{-1}$, WA 3000 RH 40, $P=98$ kPa, SKS 3 (HRC 47)]

交差角の式を利用した。図中 $f=28$ kHz, $a=7.5$ μ m, $F=25$ Hz, $A=0.75$ mm とし, $N=60\sim 950$ min $^{-1}$ と変化した場合の SF による砥石損耗率を N_{SF} 線図によって示し, SVC による損耗率を N_{SVC} 線図によって示した。本実験の範囲において N_{SF} は直線的な増加

現象を示し, $\Theta=47^\circ$ (60 min $^{-1}$) において最大値 $RL=14.6$ μ m/m を示す。SVC による N_{SVC} 線図においては $\Theta=73^\circ$ (235 min $^{-1}$) で最大値 $RL=8.6$ μ m/m を示す山形の曲線を示す。以上の現象から本実験の範囲では確認できていないが, N_{SF} 線図も, さらに交差角を大きく (回転数を小さく) することで N_{SVC} 線図と同じように $\Theta=60\sim 70^\circ$ の範囲で最大値を示すような, 図中点線で延長した線図を描くものと予測される。

また, 同加工条件における加工比を $G=\text{加工量} [\text{mm}^3]/\text{砥石損耗量} [\text{mm}^3]$ とし, 前記砥石損耗量およびそれと同時に測定した加工量から算出した。加工量については第 2 報において詳細に報告しているので本報告では加工量の記述を省略し, 加工比の算出結果のみを記述することにする。SF においては $G=0.16$ ($n=60$ min $^{-1}$) ~ 0.88 ($n=950$ min $^{-1}$) を示し, SVC の場合は 0.11 ($n=375$ min $^{-1}$) ~ 0.2 (95 min $^{-1}$) を示す。両者とも目づまり現象の伴わない仕上げ状況においては加工比 $G=0.1\sim 0.2$ 程度の値を示して顕著な差異は見られないが, 回転数を高めるに伴い砥粒の脱落, 破砕が顕著に低下する SF においては徐々に大きな値を示す。加工が進行する一方で砥石砥粒の脱落が減少する結果によるものと考えられる。

$F=25$ Hz, $A=0.75$ mm として, 超音波最大振動速度を $af=0\sim 210$ mm/s ($f=0\sim 46$ kHz, $a=0\sim 7.5$ μ m) と変化した場合の砥石損耗率を af_{SVC} 線図によって示す。 N_{SF} 線図における $\Theta=10^\circ$ ($N=375$ min $^{-1}$) と N_{SVC} 線図における $\Theta=64^\circ$ ($N=375$ min $^{-1}$) を結んだ線図を示し超音波振動速度 (Θ の増加) の増加に伴って上昇する。

SVC においては SF (N_{SF} 線図) において活発な損耗現象を示す最大交差角 $\Theta=34^\circ$ 以上 ($N=95$ min $^{-1}$ 以下) の場合に較べると小さな損耗率を示す。砥石結合度が低下して砥石の脱落と破砕がし易くなる一方, それ以上に砥粒の微小なジグザグ運動による刃先鋭利化効果⁽¹¹⁾ や砥粒運動軌跡における砥粒相互の多重性に起因した表面微細みぞ自成機構⁽¹²⁾ が作用して切削抵抗が軽減し, それに応じて砥石の脱落と破砕が抑制されるものと考えられる。そして, SVC による Θ の大きい領域における減少傾向は同一切削溝付近を重複して切削するような空振り現象⁽¹³⁾ に起因して切削量が低下し, より切削抵抗が減少することによるものと考えられる。

以上のように SVC においては砥粒の破砕と脱落が活発化される一方で切削抵抗が軽減するために, 最大交差角 Θ の変化に対し比較的緩慢な損耗率線図を示すものと考えられる。この場合の加工比は $G=0.11$

($af=138\text{ mm/s}$) ~ 0.68 ($af=0\text{ mm/s}$)を示し振動速度の減少に伴い加工比は増加する。

$N=375\text{ min}^{-1}$, $f=28\text{ kHz}$, $a=7.5\text{ }\mu\text{m}$ として低周波最大振動速度 AF を $AF=0\sim 25\text{ mm/s}$ と変化させた場合の加工能率 RL は SF の場合, AF_{SF} 線図によって示され, SVC の場合 AF_{SVC} 線図によって示される。第2報の報告で示した加工量と同じように狭い交差角範囲で急激な変化を示し, 低周波振動速度の変化に対し敏感な損耗現象を示す。砥石の低周波振動数, および振幅を大きくすることで砥粒運動軌跡の交差回数と交差に関与する砥粒数が増大する。前述したように超音波振動砥粒の運動軌跡上の多重性(切削溝の交差回数)が増大して, より微細凹凸に生成された加工表面を断続的に切削することになる。そのように, SVC においては前述の理由によって砥粒の脱落と破砕が抑制されながらも AF を高めることで砥粒に対する衝撃回数が増加し微細な破砕が進行するものと考えられる。この多重性の増加による敏感な損耗現象は SF においても同様な現象を示すものと考えられる。

この場合の加工比は SF において $G=0.42$ ($AF=25\text{ mm/s}$) ~ 1.85 ($AF=0$)を示し SVC においては $G=0.07$ ($AF=25\text{ mm/s}$) $\sim G=1.22$ ($AF=0$)を示す。両者とも振動速度の減少に伴って増加傾向を示す。

以上の線図全体を概観すると, 重畳振動砥石に種々条件を変えた場合の全ての点群は, 図中網掛けを施した領域に存在し, 工作物回転数 N , 超音波振動速度 af , 低周波振動速度 AF を変化させることで, 点群領域全体を図中矢印が示すように, 移動, 変形させる結果をもたらすことがわかる。砥石に超音波振動を付加した場合の砥石損耗率に関し, おおよそその変化傾向を読み取る上で役に立てるものと思われる。

6. 結 言

本報告において次のような結論を得た。

(1) ダイヤモンドドレッサを利用した簡易的な定荷重方式による切削実験から, 超音波振動砥石の相当結合度 RH は砥石振幅 a のべき関数を指数とする指数関数 $RH = RH_0 e^{-aa^p}$ (H_0 : 無振動時の砥石結合度)で表され, 振幅の増大に伴い見かけ上の結合度が低下することを実験式によって示した。

(2) 重畳超仕上げ(SSF)の切削加工工程である重畳振動仕上げ(SVC)実験による砥石損耗量から, (1)の結果と同じように砥石結合度 RH は砥石振動速度 af のべき関数を指数とする指数関数 $RH = RH_0 e^{-a(af)^q}$ であらわされる相当結合度特性効果を確認した。また, この特性によって重畳超振動仕上げ時

の臨界圧力が低下する。

(3) 砥石結合度・粒度, 砥石圧力, 工作物回転数, 砥石振動数・振幅などの諸条件を変化させた場合の重畳振動仕上げ(SVC)実験において, 単位時間あたり砥石損耗率 WM は従来の超仕上げ(SF)に比較しおおよそ1.3~60倍の増加を示す。

(4) 最大交差角 θ と単位加工長さあたり砥石損耗率 RL の関係を求め低周波振動速度を一定にした場合の線図傾向を見ると重畳振動仕上げ(SVC)による砥石損耗率は SF に較べて傾斜勾配の小さい山形の線図を示し最大交差角の大きい範囲($N=95\text{ min}^{-1}$ 以下)での超仕上げ(SF)に比較すると小さい値を示すことがわかった。見かけ上の砥石結合度を低下させる一方で切削力が低下するために砥粒の破砕, 脱落も抑制される結果によるものと考えられる。低周波振動速度の変化に対しては加工能率と同様に敏感に変化する現象を示す。

(5) 加工比(加工量/砥石損耗量)は SF , SVC 両者とも活発な切削状況においては同程度の値を示すが, 砥石損耗の減少に伴い増加傾向を示す。

本研究を進めるに当たり終始ご指導を載いた故宇都宮大学隈部淳一郎教授と実験に協力を載いた当時学生の田中克典氏に深謝申し上げます。

文 献

- (1) Soutome, T. and Sato, K., Study on Superposition Superfinishing (1st Report), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 751 (2009), pp. 741-748.
- (2) Soutome, T. and Sato, K., Study on Superposition Superfinishing (2nd Report), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 75, No. 758 (2009), pp. 2822-2829.
- (3) 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.
- (4) Sasaki, T. and Okusima, K., Some Contribution of Superfinish (Successive Report), *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 47, No. 327 (1944), pp. 309-312.
- (5) Matsui, M. and Nakazato, S., *The Principle of Superfinishing*, (1965), p. 29, Yokendo Publishing Co. Ltd., Japan.
- (6) Asaeda, T., Research on Superfinishing, *Research Laboratory for Precision Machinery*, (1950), p. 35, Tokyo Institute of Technology.
- (7) Japan Society for Precision Engineering, *Handbook on Precision Machining*, (1981), p. 550, Corona Publishing Co. Ltd., Japan.
- (8) Okoshi, M., Watanabe, H., Study on Stone Grade of Grinding Wheel (2nd Report), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 18, No. 6-7 (1952), pp. 197-201.

- (9) Katsumi, S. and Kumabe, J., Impact Properties of the Ultrasonic Vibrating Grinding Wheel, *The Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 41, No. 6 (1975), pp. 559-564.
- (10) Asaeda, T., Reserchs on Superfinishing, *Reserch Laboratory for Precision Machinery*, (1950), p. 98, Tokyo Institute of Technology.
- (11) Kumabe, J., Study on Ultrasonic Internal Grinding by Using the Longitudinally Vibrated Grinding Wheel (1st Report), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 27, No. 181 (1961), pp. 1404-1411.
- (12) Kumabe, J., *Fundamentals and Application of Vibration Cutting*, (1979), p. 84, Jikkyo Publishing Co. Ltd., Japan.
- (13) Tanaka, Y., Yano, A. and Shinke, N., Study on Ultrasonic Grinidinig (1st Report), *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, Vol. 34, No. 10 (1968), p. 691.
-