621.922.01

微粒といしの切削性能に関する研究 (第 4 報)*

佐々木外喜雄** 岡村健二郎*** 岡本俊明****

Research on the Cutting Performance of Fine-grain
Abrasive Stone (4th Report)

by Tokio SASAKI, Kenjiro OKAMURA and Toshiaki OKAMOTO

In order to improve the cutting ability of fine-grain abrasive stone, the relation between the cutting mechanism in the superfinish and the working condition of superfinish has been investigated.

Thus, the following results are obtained.

As to the cutting motion in the superfinish, it is found that the frequency of stone oscillation has an upmost influence to the cutting mechanism among the various conditions of cutting motion, secondly the surface speed of work and amplitude of stone oscillation influence in same order to the cutting mechanism.

When the superfinishing fluid (mixture of kerosene and oil) of higher viscosity is preferred, it is necessary to increase the cutting direction angle in order to get the most efficient condition of cutting performance.

In addition, the characteristics of honing process may be classified into "cutting", "semi-cutting" and "mirror-finishing" according to the values of stone pressure and cutting direction angle.

1. 緒 言

精密仕上に用いられる微粒といしは、従来あまり切削性の良くない、鏡面みがき作業に用いられるものであると考えられて来たが、最近ホーニング加工で見られるごとく、微粒といしにより相当切削量の多い加工が行われるようになった。

この研究では微粒といしの切削性能を改善するため第 1 報から第 3 報⁽¹⁾⁽²⁾までで、といしの切削性能を判別するための微粒といし切削性能試験機を作り、それによってといしの構成要素、すなわち結合度、気孔率、結合剤配合率、と粒率などとといしの切削性能との関係について吟味したが、このようにして切削性能の改善されたといしも、実際作業において示す加工状態はといしと工作物が面接触しながら加工するので、バイト切削や研削とは著しく相違した特性を持っている。そのために微粒といしを用いる超仕上やホーニング作業が切削能率の良い状態をうる可能性があるとともに、その実施にあたっては作業条件の選定が非常に困難であるかのごとく見えて、これらの加工法の実用化の大きな障害となっている。

この報告では主として超仕上の加工状態と加工条件との関係を検討することにより、微粒といしの切削機構を明らかにして、作業条件の選定を容易にせんとするものである。

2. 記 号 (第 1 図参照)

p : といし圧力
kg/cm²,
 f : といし振数
1/mn,
 a : といし振幅
mm,
 N : 工作物回転数
rpm,
 D : 工作物直径
mm,
 R_H : といし結合度,
 $v_w = \pi DN$: 工作物
表面速度 m/mn,
 $v_s = \pi af$: 最大といし
し速度 m/mn,

第 1 図

$\theta = \tan^{-1}(v_s/v_w)$: 最大切削方向角,
 $\theta = \tan^{-1}(v_s \cos \varphi/v_w)$: 切削方向角,
 $V = (v_w^2 + v_s^2)^{1/2}$: 最大切削速度 m/mn.

* 昭和 31 年 4 月 1 日 第 33 期通常総会講演会において講演,
原稿受付 昭和 31 年 4 月 30 日.

** 正員, 京都大学.

*** 准員, 京都大学

3. 実験装置および実験方法

i) 実験装置 この実験に使用した装置は超仕上機およびホーニング装置で, すでに報告⁽³⁾⁽⁴⁾したものと同じである。

ii) 加工状態の分類 微粒といしを用いて超仕上およびホーニングを行う場合, 加工条件によってといし加工面は ① 完全に目詰まりを起して真黒になっている場合, ② 一部目詰まりを起しては点状に黒い部分が見られる場合, ③ 全く目詰まりを生じてい

ない場合の三つに分けられる。

また工作物の仕上表面も, ① 切削筋のほとんど見られない鏡面になっている場合, ② 多少光沢はあるが, 全面に薄い切削筋の認められる場合, ③ 全く光沢がなく全面に強く切削筋が見られる場合の三つに分けられる。

これらのそれぞれ3種類の状態を組合わせて, 加工状態を次のごとく分類する。①: 鏡面状態 ●, ②: 半切削状態 ○, ③: 切削状態 ○。

なおといし面が①で工作物表面が②のような中間の状態もごく一部認められたが, といしおよび工作物の面の変化は連続的であるから, 上記の三つの状態のより近い方へ入れることとした。

といし加工面および工作物仕上表面の状態は加工を始めてから1~3分で安定するが, 上記の分類は面の状態が完全に安定した所で行うため, 加工時間は5分とした。

iii) 実験方法 超仕上において第2図に示すごとく, といし圧力 p およびといし振幅 a を一定にして, といし振数 f を大きい値から次第に小さくすることによって, と粒の切削波形を変えて行くと, すなわち最大切削方向角 θ を大きい値 (70°) より次第に小さい値に変化させると, 加工状態は切削状態 → 半切削状態 → 鏡面状態と3種類に変わる。これらの関係を数種の p について求めると図のごとく2本の限界曲線(切削限界線, 鏡面限界線)が得られる。

また p および f を一定として a を変化させることにより, θ を変化させても第3図に示すごとく, 第2図と同様の関係が得られる。

第2図および第3図に示した4種類の図を比較すると, 限界曲線の位置は一定とした a, f の値により相当移動することがわかる。加工条件とこの限界曲線の位置との関係が明らかとなれば, 超仕上の切削機構を究明することができ, 超仕上作業を任意に制御することができる。以下においては超仕上における切削運動条件 a, f および v_w を, $a=1\sim5\text{ mm}$, $f=100\sim4000\text{ rev/min}$, $v_w=4\sim20\text{ m/min}$ の範囲で種々に組合わせて加工状態を調べる。

4. 超仕上切削運動条件と限界現象の関係

切削運動条件以外の超仕上作業条件は工作物材質: クロム鋼 (かたさ $Rc\ 47$), 工作物直径 $D: 33\text{ mm}$, といし圧力 $p: 2.0\text{ kg/cm}^2$, といし: WA, #600 vit. $R_H\ 50$, 工作液粘度: $1.6\sim1.7^\circ\text{E}$ である。

i) 工作物表面速度 v_w の影響 第4図は工作物表面速度 v_w と最大切削方向角 θ の関係における限界曲線を示し, 第5図は工作物表面

第2図

第3図

第4図

第 5 図

第 6 図

速度 v_w と といし振数 f の関係における限界曲線を示す。

第 4 図より明らかなごとく、切削限界線は v_w が大きくなるにつれて次第に θ の小さい所で現われる。第 4 図と第 2 図および第 3 図を比較すると、 v_w の切削限界点への影響はといし圧力 p と同等あるいはそれ以上に大きいものであることがわかる。鏡面限界線も切削限界線と同様に v_w の大きくなるにつれて、 θ の小さい所で現われるが、切削限界線の場合ほどその移動は大きくない。

以上の原因を考察すれば、 v_w が大きくなるとき、

θ を一定に保つには、 $\theta = \tan^{-1} \frac{\pi a f}{v_w}$ であり、この場合 a を一定としているから、 f を大きく取らなければならない。第 4 図中に示した鎖線はといし振数が一定の曲線である。しかし f が大きくなれば、といし切削面上の と粒 に働く切削抵抗の作用方向は非常に早く変化することになり、と粒のへき開 および脱落を促進することになる。また θ の大小は切削面上の と粒 に働く切削抵抗の作用方向範囲を与えるものであり、 θ の大きいことは と粒 のへき開 および脱落を促進することになる。すなわち θ も f もともに大きくなるほど切削状態になりやすい。第 5 図に示すごとく、限界線を与える f の値は両限界線とも v_w の増加につれて、ほとんど直線的に増加し、半切削領域の幅はほとんど一定である。したがって v_w の増加につれて限界線を与える θ の値は次第に小さくなり、 f が増加することにより切削状態の領域へ移動しようとする傾向を押さえて、切削状態と半切削状態あるいは半切削状態と鏡面状態の境界の加工状態を保つものと考えられる。

ii) といし振幅 a の影響 第 6 図は a と θ の関係における限界曲線を示し、第 7 図は a と f の関係における限界曲線を示す。図より明らかなごとく限界曲線はいずれの切削速度においても a の増加につれて、 θ の大きい方へ、また f の小さい方へ移動する。これらの関係は第 4 図および第 5 図の場合とちょうど逆の傾向である。その原因は i) で述べたと同様であり、 $\theta = \tan^{-1} \frac{\pi a f}{v_w}$ の式において、 v_w が分母にあるのに対して a は分子にあるため、限界点を与える θ および f の変化が、 v_w の場合とは逆になるのである。

しかし第 4 図と第 6 図および第 5 図と第 7 図における限界曲線の形より、 v_w および a の加工状態に及ぼす影響を吟味すれば、第 4 図および第 5 図において v_w が 5 m/min から 15 m/min に変化した場合、切削限界点を与える θ の値は $23^\circ \sim 25^\circ$ 程度変化し、 f の値は 600 $\sim$ 1100 mm/rev 程度変化する。また第 6 図および第 7 図において a が 1 mm から 3 mm に変化した場合、切削限界点を与える θ の値は $26^\circ \sim 30^\circ$ 程度変化し、 f の値は 500 $\sim$ 1100 mm/rev 程度変化する。

したがって工作物表面速度 v_w およびといし振幅 a の限界現象に及ぼす影響はほとんど同程度であると見ることができる。

iii) 限界曲面 以上の実験結果より、切削運動条件 v_w, f および a の三つの値を直交座標軸とする空間において、切削限界および鏡面限界を与える曲面(限界曲面)がどのような形を取るかを示せば第 8 図のごとくである。

また最大切削方向角 θ も切削運動条件 v_w, f および

第 7 図

第 8 図

a の値により決まるものであるから, θ が一定の面を第 8 図と同様に v_w, f, a を直交座標軸に取って図示すれば, 第 9 図のごとく v_w 軸および a 軸を含む平面と θ 一定の面との交線は直線となり, af 面と θ 一定の面との交線は双曲線となる。

第 8 図と第 9 図を比較すれば, 限界曲面は θ が一定の曲面に比して, av_w 平面に比較的平行である。

したがって切削運動条件のうちで, 加工状態に最も大きな影響を及ぼすものはいし振数 f であることがわかる。

iv) 最大切削方向角 θ が一定の面における限界現象 前述のごとく限界曲面と θ が一定の曲面とはそ

第 9 図

第 10 図

の形が多少異なる。したがって, 両曲面は相交わることが考えられる。すなわち, θ が一定の面においても切削限界線および鏡面限界線が現われるものと考えられる。

第 9 図に示した θ が一定の曲面を実験の際に用いた v_w の点を通り af 面に平行な平面で切りその交線を af 面に投影した形で現わすこととしこの上で限界線がどのように現われるかを検討した結果を第 10 図に示す。

図より明らかなごとく $\theta=30^\circ$ の面においては実験の範囲で切削状態は全く現われていない. θ の値が大きくなるにつれて切削状態の領域が広くなり, $\theta=60^\circ$ の面においては, f および v_w の小さく a の大きい所で一点だけ半切削状態が得られるのみで, 実験範囲全体が切削状態になっている.

結局最大切削方向角 θ が一定の場合, 鏡面状態は a の大きく f の小さい所で得られ, 切削状態は a の小さく f の大きい所で得られる. また, 両限界線とも v_w の大きい所では a 軸に平行となることから, θ が一定の場合, 加工状態へのといし振幅 a および工作物表面速度 v_w の影響は非常に小さいことがわかる.

5. 超仕上におけると粒切削軌跡の解析

丸棒を超仕上する場合, といしの振動と工作物の回転により工作物の表面には第 1 図に示すように, 正弦波のと粒切削軌跡が現われる. この波形と切削機構との関係を検討するため次の計算を行った. 一つのと粒の切削長さを S , と粒の平均切削速度を $\bar{v}$, 加工時間を t とすれば,

$$\bar{v} = 2 \frac{V}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \varphi} d\varphi = \frac{2V}{\pi} E(\theta)$$

$$t = \varphi / 2\pi f \quad \therefore S = vt = \frac{aV}{\pi v_s} \varphi E(\theta)$$

$$\text{しかして } \theta = \tan^{-1} \frac{v_s \cos \varphi}{v_w}$$

$$\therefore \frac{dS}{d\theta} = -\frac{a}{\pi} E(\theta) \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta} \times \frac{1}{\cos^2 \theta \sqrt{1 - \cot^2 \theta \tan^2 \theta}}$$

a を 1 とした場合の $dS/d\theta$ の計算結果を第 11 図に示す. $|dS/d\theta|$ の大きいことはその角度 θ の方向に切

第 11 図

削される距離が大きいことを示す. すなわちといし切削面上のと粒へ, その角度 θ の方向に切削抵抗が作用しながら運動する距離の長いことを示す. したがって θ のすべての範囲にわたって $dS/d\theta$ が大きいほ

ど切削面上のと粒はへき開および脱落を起しやすく, 切削状態になりやすい. $dS/d\theta$ の値が一定値 (使用するといしの構成要素から決まる) より小さい場合には, 切削面上のと粒はへき開あるいは脱落を起さないものと考えられる.

第 11 図より $(dS/d\theta)/a$ の値は θ の大きくなるにつれて次第に大きくなり, θ が θ に近づくにつれて急激に大きくなる. また $\theta=0^\circ$ における $(dS/d\theta)/a$ の値は θ の小さいほど大きい. θ の大きいたとえば $\theta=80^\circ$ の場合, $\theta=0^\circ \sim 40^\circ$ の範囲では $(dS/d\theta)/a$ の値は非常に小さい. したがって θ が大きくなれば切削面上のと粒に作用する切削抵抗の作用方向範囲は広くなり, と粒の脱落, へき開を促進するが, あまり θ が大きくなると切削抵抗の作用方向範囲のうち大半はと粒のへき開, 脱落に有効でなくなるものと思われる. このことは既報⁽⁶⁾の論文において θ とといし減量の関係を求めた場合, といし減量の最大となる θ の値は 70° 程度であることから明らかである.

結局, 超仕上において切削能率を改善するためには θ の全域にわたって $(dS/d\theta)/a$ の値が比較的大きく, かつ θ の存在範囲の広い (θ の大きい) 運動をいしに与えればよいことがわかる.

6. 工作液粘度と限界現象の関係

超仕上において, 工作液の切削機構に及ぼす影響を検討するため, 工作液の粘度を軽油とマシン油の混合比を調整することにより変えて, 4. と同様に加工状態を観察した結果, 第 12 図に示すごとく, 切削限界線も鏡面限界線もともにほとんど工作液粘度の増加に比例して切削方向角 θ の大きい方へ移動する.

第 12 図

この原因は粘度の高い工作液ほど工作物とといしの間の潤滑作用がよくなり, といしは目詰まりを生じやすくなるため, 切削状態を持続するためには最大切削方向角 θ を大きくしなければならないからである. なお実験は工作物表面速度 $v_w=11.96$ m/mn, といし振幅 $a=2$ mm, といし圧力 $p=2$ kg/cm² の一定でといし振数 f を変えて最大切削方向角 θ を変化させたものである.

7. ホーニングにおける限界現象

ホーニングにおいては、 θ といしは工作物表面に対して相交わる2方向に運動させられるから、切削面上の θ と粒に作用する切削抵抗はその2方向のみとなり、切削方向角(交さ角の1/2)の値を変えても、超仕上の場合のごとく切削抵抗の作用方向範囲が変えることはない。ホーニングにおいては、切削運動条件により θ といし切削面の状態はあまり変化しないように考えられる。

第13図は超仕上の場合と同様な加工状態の分類方法により、ホーニングの場合の限界現象を検討した結

第13図

果である。この場合切削方向角 θ を変えるためには、 θ といしの単位時間当りの往復回数および工作物表面速度 v_w を変えたが、合成切削速度 V は50 m/mn程度に一定とした。なお工作物材質、 θ といし、工作液等はすべて超仕上の場合と同一である。

図より明らかなごとく、ホーニングの場合も超仕上

の場合に類似した結果が得られた。すなわち、 θ といし圧力 p および切削方向角 θ を変えれば加工状態は前記の3種類に変化する。しかしこの場合、切削方向角の変化による加工状態の変化は緩慢で、半切削状態の角度範囲が超仕上の場合より広くなる。また θ といし圧力 p が大きくなるにつれて半切削状態の角度範囲はますます広がって行き、実際作業に用いる切削方向角の範囲ではほとんど加工状態の変化を起さなくなる。

8. 結 論

以上の実験結果ならびに考察より次の結論をうる。

- (1) 超仕上切削運動条件のうちで、加工状態に最も大きな影響を及ぼすのは θ といし振数である。
- (2) 工作物表面速度および θ といし振幅の切削機構への影響は同程度で、 θ といし振数の影響に比して小さい。
- (3) 最大切削方向角が一定の場合でも、それを与えるための運動条件が変れば加工状態は変る。
- (4) 超仕上において工作液の粘度を増せば、切削限界を与える最大切削方向角の値は大きくなる。
- (5) ホーニングにおいても切削方向角の値により加工状態は変化するが、 θ といし圧力の高い場合は加工状態はほとんど半切削状態のみになる。

文 献

- (1) 佐々木・岡村, 機械学会論文集, 20巻98号, 648ページ(昭29).
- (2) 佐々木・岡村, 第32期定時総会講演会前刷.
- (3)(5) 佐々木・岡村, 機械学会論文集, 20巻90号, 72ページ(昭29).
- (4) 佐々木・岡村, 名古屋臨時大会講演会前刷.