

砥粒切刃による仕上面生成機構に関する研究

佐藤元太郎*

(昭和47年5月31日受理)

1 緒 言

砥粒切刃による精密仕上法は研削，ホーニング，ラッピング，超仕上等種々あげられるが，本報はそのうちの超仕上に関する基礎的研究である。超仕上は一般的には粒度の細かい，結合度の比較的弱い砥石を弾性的な低い圧力で工作物表面に押しつけ砥石と工作物との間に相対的な運動をさせながら同時にどちらか一方に振動を与えて微細な切削をおこなわせて仕上面を生成する加工法である。しかしながら超仕上は作業条件の因子が多く，しかも各因子相互に微妙な関係をもっているために適切な作業条件を選定しないとよい仕上面が得られない。したがってこれら各因子の仕上面におよぼす影響について理論的，あるいは実験的解析が必要となる。

そこで本報では実用されている砥石を用いて，18-8ステンレス鋼，および軟鋼を超仕上する場合の最適超仕上条件を求める実験的研究をおこない，各因子をパラメータにしたときの仕上面の生成機構について2～3の検討をおこなったので報告する。

2 砥粒切刃の運動軌跡

本報でおこなった円筒面の超仕上において，一個の砥粒の工作物上に描く切削運動の軌跡は図1のような正弦曲線であらわされ，この場合の切削速度 v ，最大傾斜角 θ ，最大切削速度 v_{\max} ，平均切削速度 \bar{V} はいづれも次式で示される。

$$v = \pi\{(DN)^2 + (an \cos \beta)^2\}^{1/2} \quad (2-1)$$

$$\theta = \tan^{-1}(an/DN) \quad (2-2)$$

$$v_{\max} = \pi\{(DN)^2 + (an)^2\}^{1/2} \quad (2-3)$$

$$\begin{aligned} \bar{V} &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} v d\beta \\ &= \frac{2}{\pi} V \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2 \theta \sin^2 \beta)^{1/2} d\beta \end{aligned} \quad (2-4)$$

研削条件としてはこれら各因子をパラメータとして選ぶわけであるが，これらのうちで仕上効果に最も影響があるものとしては最大傾斜角 θ と切削速度 v であることが知られ

* 機械工学教室 講師

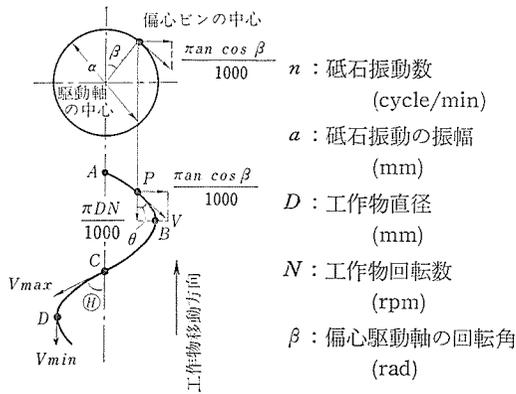


図1 砥粒の運動軌跡説明図

することは超仕上機構の解明に有効な手段である。したがっていままでに種々の超仕上用ダイナモメータが試作され発表されている¹⁾²⁾。本報では機構的にも簡単でしかも二分力が同時に測定できるようなダイナモメータの製作を試みた。

すなわち加圧腕の先端の砥石ホルダに図2に示すような位置に振動分力および回転分力を検出するための切欠きを設け、各切欠き部にストレインゲージをはりつけ、それぞれの分力に相当するひずみ量をストレインメータによって検出し、これをペン書きオシログラフによって記録させた。

しかしながら本装置の問題点としては一つの検出器から二分力を同時にとり出す機構である

ためにある程度の干渉はさけられないことである。そこで二分力の干渉の程度を知るためにダイナモメータの先端の砥石固定板を図3に示すように30°づつ等分し、矢印の方向に引張荷重200gをばねばかりによって作用させそのときのひずみ量をチャートに記録させた。その結果、図よりあきらかのように両分力はともに正弦曲線にのっており、本研究の目的には十分使用できることを確認した。なお図4は試作ダイナモメータの較正曲線であり、直線性が完全に保持されている。また図5は試作ダイナモメータによる研削時の各分力の測定例を示す。

ている。いままでの研究では切削速度として v_{max} を採用しているものがほとんどであるが、 v_{max} という一点の速度を考えるよりも \bar{V} のような全体の点の平均速度を考えた方がより実状にあうと思われるので、本報では \bar{V} を切削速度として採用した。

3 超仕上用ダイナモメータの試作

砥粒切削の受ける切削抵抗を解析

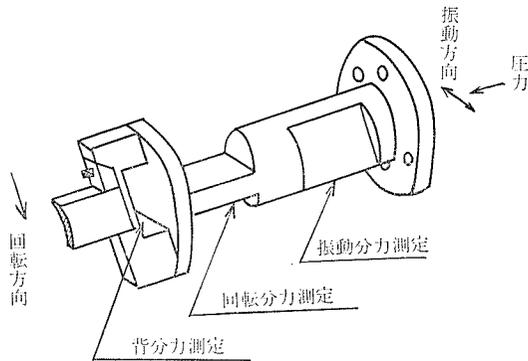


図2 試作ダイナモメータ模形図

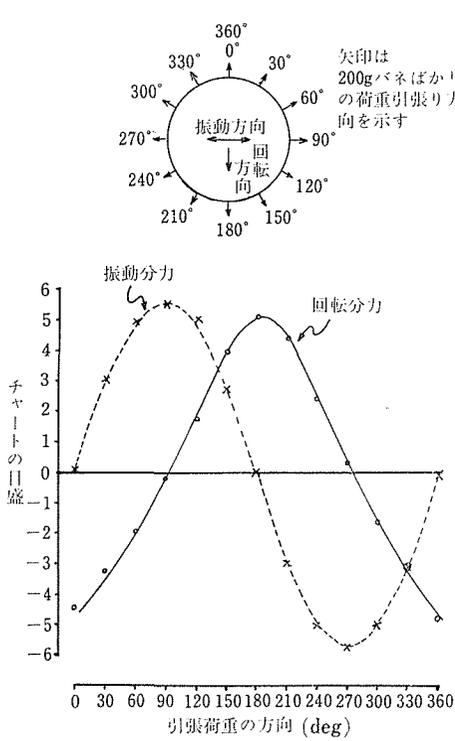


図3 二分力干渉検討図

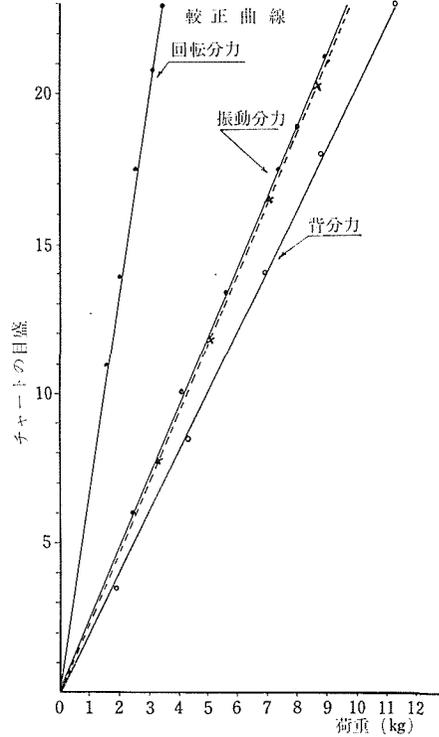


図4 試作ダイナモメータ校正曲線

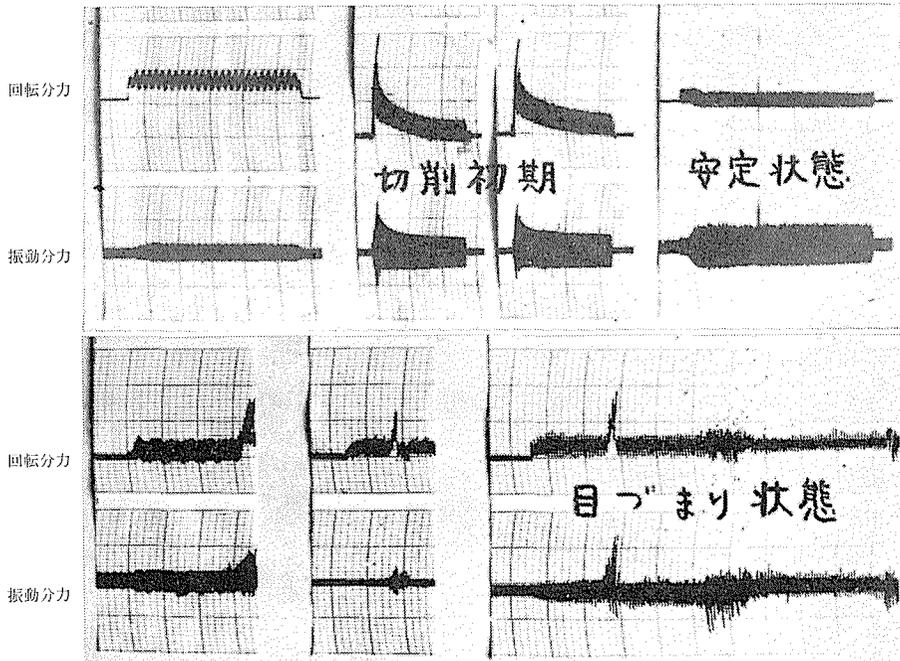


図5 試作ダイナモメータによる測定例

4 等切削速度線図

円筒外面超仕上における最大切削速度 v_{\max} 、および平均切削速度 \bar{V} は、砥粒切刃の運動軌跡の項ですでにのべたように (2-3), (2-4) 式によって示される。したがって等しい v_{\max} を与えるような線図を作製するためには (2-3) 式よりあきらかのように $(an-DN)$ 座標における円周上の点をえらばよいことがわかる。一方 \bar{V} は $\sin \theta$ を母数とする第 2 種完全楕円積分を含む式によってあらわされるためにあらかじめ等平均切削速度線図を作製しておくとな非常に便利である。そこで \bar{V} を示す式, (2-4) 式より $(an-DN)$ 座標上に θ をパラメータにした線図を作製すると図 6 に示すような離心率 $(0.59)^{1/2}$ なる楕円が得られ、これを用いると任意の θ の値に対する等平均切削速度は楕円上の各点をえらば容易に得られる。

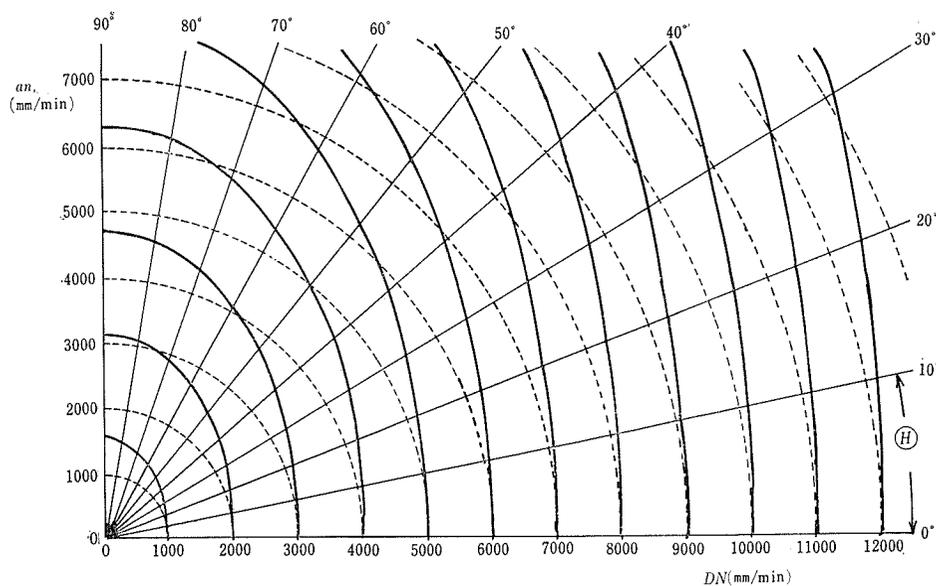


図6 等切削速度線図

5 実験方法

実験装置は大隈鉄工所製の高速旋盤に小金井製作所製 SF 115 型超仕上装置を取りつけて円筒外面超仕上をおこなった。砥石振動数は電源 60 \sim で 1430, 1730, 2030 (cpm) の 3 段階で振幅は 0.5 \sim 3.5 mm まで 0.5 mm おきに 8 段階に切り換えられ、さらに押し付け圧力は加圧腕に表示されている目盛に合わせてにぎりをまわすことにより所定の圧力が得られるようになっている。

被削材は 18-8 ステンレス鋼、軟鋼いづれも旋削によりヘールバイトで仕上げたのちに研削仕上をおこない、実験前の表面あらさを可能な範囲で統一した。さらに被削材端部より 18 mm ごとに幅 2 mm の溝を切込み、区切りをつけて供試材とした。

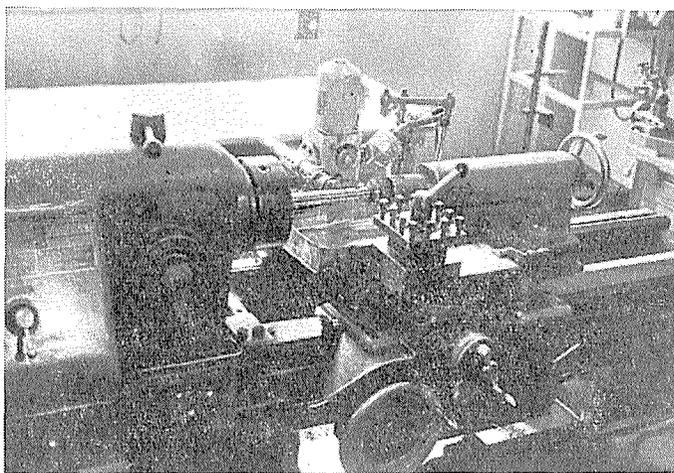


写真1 実験装置

使用砥石は予備実験によって数種類の砥石から本実験の目的にもっとも適するものと思われる WA 600 vit RH 60 を選定しこれを用いた。しかしながら仕上面あらさの比較などをおこなうために PVA 砥石も一部使用した。

測定方法：砥石減量の測定は砥石面の曲率と等しい弧をもつ軟鋼棒のアダプターを作り、これを砥石曲率面に押し当て、マイクロメータではさんで測定した。超仕上量は 45° づつ 4 個所供試材の直径をマイクロメータで測りその平均値をとって体積に換算して実験値とした。仕上面あらさは触針式あらさ計(東京精密製)およびオリンパス製 TO 式顕微干涉計を用いて測定した。なお写真 1 は実験装置を示す。

6 実験結果および考察

6-1 超仕上抵抗について

超仕上抵抗を実測することにより砥粒が仕上面を生成してゆく過程をある程度推測することができる。図 7～8 は WA 600 vit RH 60 の砥石を用い砥石押し付け圧力 2 kg/cm^2 、平均研削長さ 10 m の研削条件で 18-8 ステンレス鋼(以下ステンレス鋼と呼ぶ)および軟鋼を超仕上した場合の最大傾斜角 θ と超仕上抵抗との関係を求めたものの一例である。これによると振動分力は両被削材ともに最大傾斜角 θ によりいちじるしく影響され、 θ の値と振動分力の値はほぼ直線的な関係にあることが実測せられた。一方回転分力は θ に対してほとんど変動せず軟鋼においては θ の値が大きくなるにつれてわずかながら減少の傾向を示している。

このことについて若干の考察を加えると、超仕上抵抗については次のような考え方が、理論的に松井³⁾によりなされている。すなわち砥石を構成する砥粒切削一個をとり出し、これに作用する力を考え、次に同時切削砥粒数をこれに乗じたものが超仕上抵抗であるとする考え方である。

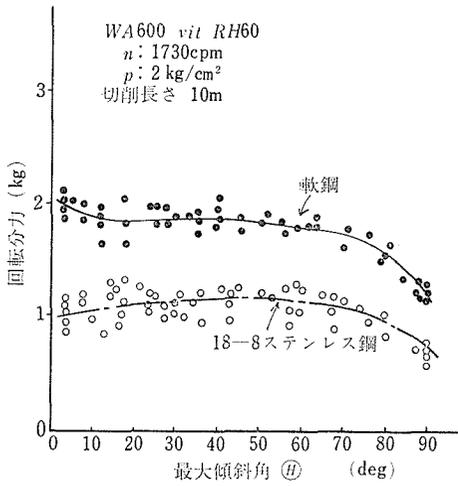


図7 最大傾斜角と回転分力との関係

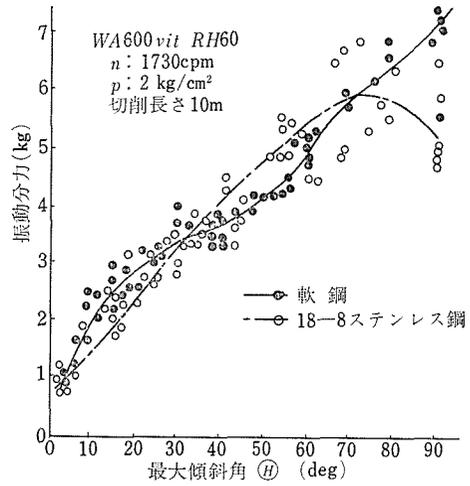


図8 最大傾斜角と振動分力との関係

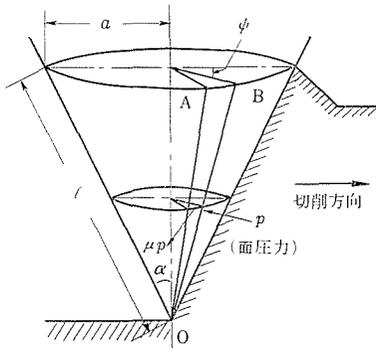


図9 様型単粒に働く切削抵抗

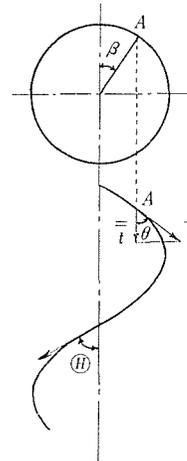


図10 任意の位置Aに働く切削抵抗

実際の砥粒切刃の形状はまちまちで解析困難であるために、簡単に図9に示すような円すい状の切刃を考える。この場合一個の砥粒に働く水平抵抗 \bar{t} は次の2つの力の和と考えることができる。すなわち、

- ① 工作物の一部を切屑として分離させ、また一部を塑性変形させて切刃の両側に盛り上がるのに必要な力
 - ② 工作物と切刃との間の摩擦力にうちかつための力
- とである。

以上のような考え方から \bar{t} を導くと次に示すような式が成立する。ここで μ は摩擦係数である。

$$\begin{aligned}\bar{t} &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p \cdot \frac{1}{2} l^2 \sin \alpha \cos \alpha \cos \phi \, d\phi + 2 \int_0^{\pi/2} \mu p \cdot \frac{1}{2} l^2 \sin \alpha \sin \phi \, d\phi \\ &= pl^2 \sin \alpha \cos \alpha + \mu pl^2 \sin \alpha\end{aligned}\quad (6-1)$$

また図9で微小部分OABに働く力の垂直成分の抵抗力を \bar{p} とすると \bar{p} は次式で示される。

$$\bar{p} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p \cdot \frac{1}{2} l^2 \sin^2 \alpha \, d\phi = \frac{\pi}{2} pl^2 \sin^2 \alpha \quad (6-2)$$

したがって超仕上の場合には図10よりあきらかのように、一個の砥粒切削の任意の位置Aにおける切削抵抗 \bar{t} の水平成分を \bar{i} とすると

$$\begin{aligned}\bar{i} &= \bar{t} \cos \theta \\ &= \bar{t} \frac{1}{\sqrt{1 + (an/DN \cos \beta)^2}}\end{aligned}\quad (6-3)$$

ゆえに β を $0 \sim \pi/2$ にとり平均を求めると

$$\begin{aligned}dT &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \bar{i} \frac{d\beta}{\sqrt{1 + (an/Dn \cos \beta)^2}} \\ &= \frac{2}{\pi} \bar{i} \cos \theta \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \beta}} = \frac{2}{\pi} \bar{i} \cos \theta \cdot E'(\theta)\end{aligned}\quad (6-4)$$

したがって超仕上抵抗の水平成分 T は同時切削砥粒数を j とすると

$$\begin{aligned}T &= dT \cdot j = \frac{2}{\pi} \cdot \bar{i} \cdot \cos \theta \cdot E'(\theta) \cdot j \\ &= \frac{2}{\pi} \cdot j p (l^2 \sin \alpha \cos \alpha + \mu l^2 \sin \alpha) \cdot \cos \theta \cdot E'(\theta)\end{aligned}\quad (6-5)$$

同様にして垂直成分 p は

$$\begin{aligned}p &= \bar{p} \cdot j \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot j \cdot pl^2 \sin^2 \alpha\end{aligned}\quad (6-6)$$

そこで(6-5)式で示される水平成分 T は本報での回転分力に相当し、同様にして(6-6)式の垂直成分 p は振動分力をあらわすものである。いま最大傾斜角 θ の値を変えるために砥石の振幅 a 、および振動数 n を変えるとする、砥粒の切削方向は $+\theta$ から $-\theta$ に大きく変化し、砥粒の脱落、破砕が促進され、砥粒切削の先端角、すなわち円すい角は常に一定のしかも小さな値を維持する。したがって円すいの母線の長さ l は常に α が大きなものに比較して大きな値となる。以上のことから(6-5)式は θ の値が大きくなると括弧内 $(l^2 \sin \alpha \cos \alpha + \mu l^2 \sin \alpha)$ の値は増えるが $\cos \theta$ 、 $E'(\theta)$ は逆に減少するため全体としては

T の値は θ に影響されない。また (6-6) 式の垂直成分すなわち振動分力は θ の値が大きくなると前述したように、円すい角 α の値が常に小さいために母線の長さ l は大きくなり、 l は θ の変化にかなり影響されるものと考えられる。

6-2 砥石減量, 超仕上量, 仕上面あらさについて

超仕上作業には砥石減量と超仕上量との関係から脱落型, 目つぶれ型, 脱落目つぶれ型の3型式が知られ, 脱落型の場合には砥粒切刃は円すい状をなし, 目つぶれ型は球状, 脱落目つぶれ型は最初円すい状であったものが次第に球状をなすものと考えられている。したがって超仕上量, 砥石減量, 仕上面あらさの相関関係を知ることにより, 切削時の切刃の状態を予想することが可能である。

図11~12は WA 600 vit RH 60 の砥石でステンレス鋼および軟鋼いづれの場合も $\bar{V} = 0 \sim 35 \text{ m/min}$ の範囲で最大傾斜角 θ の値を種々かえて実験をおこなった結果の一例である。これによると,

(i) 砥石減量については, ステンレス鋼の場合 $\theta = 50^\circ$, 軟鋼では $\theta = 60^\circ$ 付近の範囲までは砥石減量は θ の値に比例して増加している。また (ii) 超仕上量についてはステンレス鋼の場合は $\theta = 20^\circ$, 軟鋼では $\theta = 15^\circ$ でピークに達し, それ以上の θ に対しては減少している。そこで砥石減量と超仕上量(切削量)の各値を対比させてみると, 次のようなことがいえる。すなわち $\theta = 20^\circ$ までの範囲では砥石減量と超仕上量とは比例関係にあり, ここでは砥粒全体の脱落よりもむしろ破碎が活発で, つねに鋭利な切刃が自生しているために超仕上量(切削量)が増加するものと考えられる。しかしながらこの点(20°)をすぎると砥粒は脱落型に移行し砥石減量は増加するが超仕上量は逆に減少しており, さらに $\theta = 60^\circ$ をこえると目つぶれ型になり砥石減量, 超仕上量とも減少してゆく傾向にある。(iii) 仕上面あらさについては上述の砥石減量, 超仕上量と相関関係にあり $\theta = 20^\circ \sim 60^\circ$ の間の脱落型では仕上面あらさは悪く, 一方 θ が 0 に近づくにつれて, あるいはまた $\theta = 60^\circ$

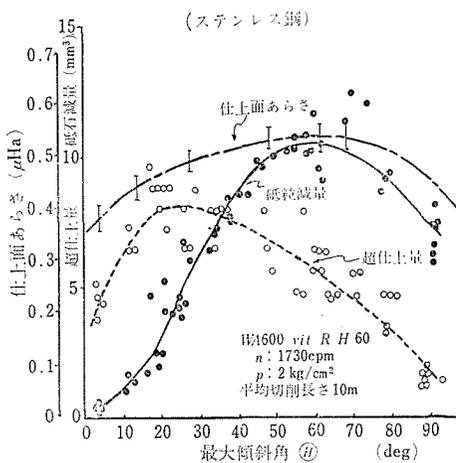


図11 最大傾斜角が, 超仕上量, 砥石減量, 仕上面あらさにおよぼす影響

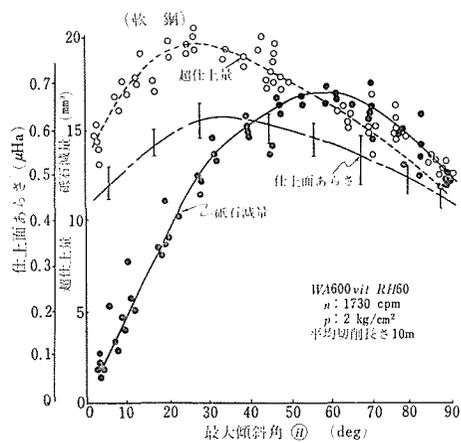


図12 最大傾斜角が, 超仕上量, 砥石減量, 仕上面あらさにおよぼす影響

をこえると仕上面あらさは非常にようになっており、この現象は砥石減量の減少と関係することがわかる。すなわち切刃が丸味を帯びて鈍化し、ほとんど切屑を出さずに工作物表面をこすっている状態、いわゆるポリッシング作用によって仕上面は良好になることを意味している。

6-3 最適超仕上条件の選定について

さきに求めた超仕上抵抗、砥石減量、超仕上量、仕上面あらさの各値を一括して示すと図13~14のようになる。これに示された実験値を総合的にみると、ステンレス鋼の場合は砥石減量が比較的少なく、超仕上量の多い、しかも仕上面あらさおよび超仕上抵抗の値が小さいような条件を満足する最大傾斜角 θ の値はほぼ 18° 附近である。同様に軟鋼の場合も図14よりあきらかのように前者とほとんど同じ傾向を示しており最適の最大傾斜角 θ は 10° ぐらゐとなり、ステンレス鋼と比較してやや小さな値を示している。最大傾斜角が 18° および 10° が決定したので、これらの値のもとで最適切削速度を求めた結果を図15~16に示した。実験条件としては \bar{V} の変化による各値の影響をみるために $a: 0.5\text{mm}$, $n: 1430\text{cpm}$, $p: 2\text{kg/cm}^2$ を一定にしておこなった。仕上面あらさ、超仕上量、砥石減量、各値より最適切削速度 \bar{V} の値をきめると、ステンレン鋼の場合、 $\bar{V} = 15\text{m/min}$ 、軟鋼については $\bar{V} = 20\text{m/min}$ であった。

以上求めた θ の値については従来より推しようされている値(推しよう値、 $\theta = 15^\circ$)⁴⁾ とほぼ一致し、また \bar{V} についてはすでにNi-Cr-Mo鋼の推しよう値が $\bar{V} = 18.5\text{m/min}$ 、S15Cのそれが 12.5m/min と報告されているが⁵⁾、ステンレス鋼の \bar{V} の値がNi-Cr-Mo鋼の値に近いことはうなずけるが、S15Cの値と本報の軟鋼の値がかなりの差を示していることについてはさらに詳細な検討が必要である。

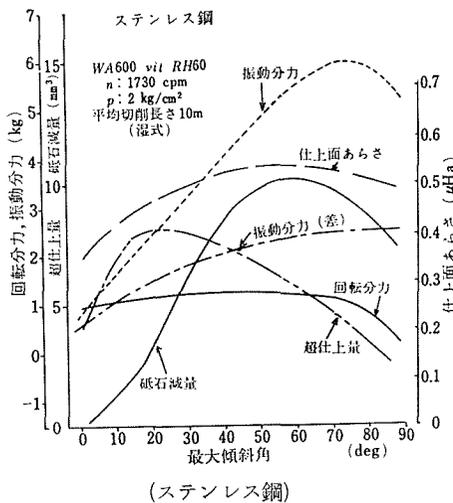


図13 最大傾斜角と諸量との関係

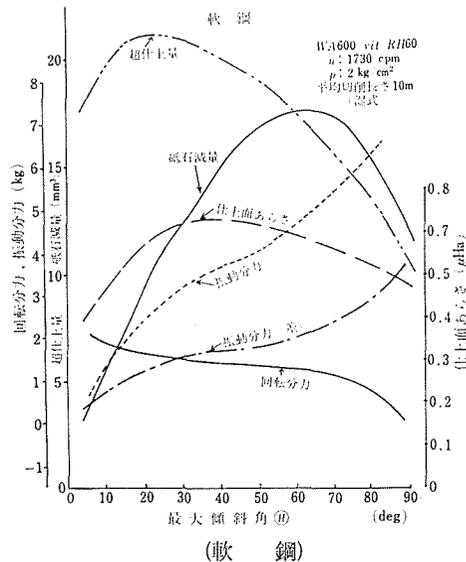
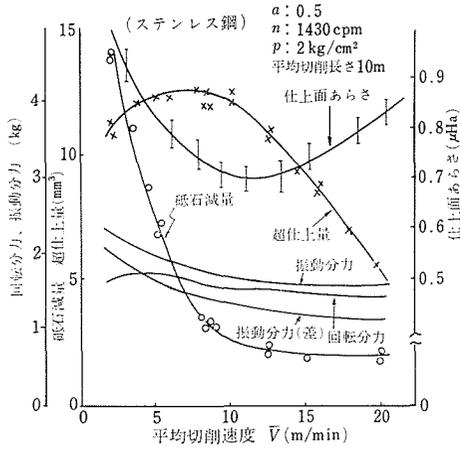
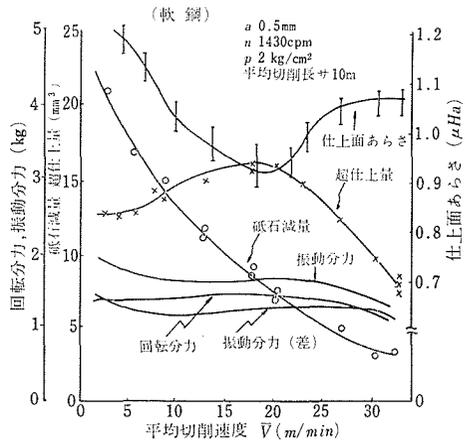


図14 最大傾斜角と諸量との関係



(ステンレス鋼)
図15 平均切削速度と諸量との関係



(軟鋼)
図16 平均切削速度と諸量との関係

7 結 論

以上砥粒の仕上面生成機構に関する基礎的研究をおこなうにあたり、本報ではとくに超仕上の問題を取りあげて実験的検討をおこなった結果、次のようなことをあきらかにした。

(1) 超仕上の切削機構を実験的に解析するための必要性から、超仕上抵抗を比較的容易に、しかも正確に測定できるようなダイナモメータの製作を試みた。その結果試作超仕上用ダイナモメータは簡単な機構でしかも二分力を同時に測定でき、十分実用に供せられることを確認した。

(2) ステンレス鋼および軟鋼の最適超仕上条件を求めた結果その値はそれぞれ次のようであった。ステンレス鋼の最大傾斜角 θ の値は 18° 、 \bar{V} の値は 15 m/min であり、また軟鋼のそれぞれの値は $\theta: 10^\circ$ 、 $\bar{V}: 20\text{ m/min}$ であった。

終りに本研究をおこなうにあたり、終始御指導御助言をいただいた当学部加藤良雄教授、ならびに実験に協力された当時大学院生であった武井和夫氏に深謝いたします。

文 献

- 1) 松井正己：機械の研究，12-2 (1960)，269.
- 2) 佐藤健児：精密機械，22-4 (1956)，127.
- 3) 松井正己：精密機械，22-11 (1956)，477.
- 4) 竹中規雄：研削加工，誠文堂，(1967).
- 5) 中里昭三，松井正己：超仕上作業とその原理，養賢堂，(1964).

Summary

Studies on the Cutting Mechanism of Abrasive Grain (on the precision finishing by superfinishing)

Mototaro SATO

(Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

The purpose of this research is to examine how the roughness of surface in superfinishing is influenced by the cutting conditions.

As there are many factors, however, which have direct influences upon the superfinishing action, the main object reported in this paper is to examine and determine the optimum condition to obtain a good surface from the relation between the rough surface and the maximum cutting angle or the average cutting speed especially in the cases of superfinishing 18-8 stainless steel and mild steel.

The results obtained were summarized as follows.

1. The author designed a new superfinishing dynamometer as shown in Fig. 2. The dynamometer was found to be very useful, because it attains good stability and high accuracy.
2. According to the experimental data, the effective maximum cutting angle of the abrasive stone and the average cutting speed in the case of 18-8 stainless steel are about 18° and 15 (m/min), while in the case of superfinishing mild steel they are about 10° and 20 (m/min) respectively.