

砥粒切刃による仕上面生成機構に関する研究 (2)

(模形切刃による仕上面生成過程)

佐藤元太郎*

(昭和48年5月31日受理)

1. 結 言

砥粒加工の場合一個の砥粒によって工作物材料が変形分離され、それが切くずとして除去されるとき、切込みが非常に小さいという事実から、研削の機構の研究はむしろ最初に Bowden & Tabor ら⁽¹⁾の摩擦理論の中でとりあげられていた。

しかしながら研削加工をおこなった場合にきらかに切くずが認められるということから考えても、研削機構の検討は、摩擦機構の解析の導入よりも、切削機構によった方がより妥当であることが大越らによって指摘され、現在では砥石による研削機構をきらかにするための有効な手段とし、砥石に含まれる個々の砥粒の切削機構を究明する試みが数多くなされている⁽²⁻⁴⁾。

その結果砥粒による切削作用はバイトなどの切削工具と本質的には同じ作用であるとしながらも、一方では切刃が直接切くずを被削材から切り離すのではなく、刃跡の側壁、すなわち切削溝の両側に材料がもり上がり、この現象がくり返され、やがてその部分が加工硬化して切くずの形で取り去られてゆくことが指摘されている。したがって研削加工にはバイト切削に類似の領域と、砥粒切削特有の切削領域が存在し、これらの遷移領域は加工条件により、かなり変化するものであることが予想される。

そこで本報では、バイト切削から砥粒切削への遷移過程を検討し、砥粒が仕上面を生成する過程を観察するために、バイトおよび砥粒に類似の模形切刃を用い、被削材として18-8ステンレス鋼 (sus 27)、および、S45c を供試材として種々の実験をおこなった。さらに同じく砥粒を用いる加工である超仕上について、研削機構が、そのまま超仕上にも適用できるか、その差異をきらかにするために若干の実験的考察をおこなったので報告する。

2. 模形切刃について

実際の砥粒切刃の形状は複雑で、しかも加工中は砥粒の^{ひび}劈解による自生作用のために絶えず変化している。したがってこれを定量的に論ずるのはむりであり、これはすべて統計的手法に従って論ずべきものであると考える。

本実験では模形単粒の切刃角をできるだけ実際の砥粒切刃角に近似させるために、PVA砥石をドレッシングしたのちのWA60砥粒を適ぎ取り出しその切刃角を写真測定により

* 機械工学教室 講師

しらべた。

写真1はとり出した砥粒の顕微鏡写真の一例である。この写真をもとにして砥粒切刃角度の分布をとると図1のようになる。この図よりあきらかのように砥粒切刃角度は大体 $100^{\circ}\sim 130^{\circ}$ の範囲に存在し、したがって負のすくい角をもった切刃であることがわかる。

そこで前述したように本報の実験目的である砥粒切削の特異性を検討するために、4種類の模形切刃を作製した。すなわち図2(a)に示したようにすくい角 14° の普通バイトと図2(b)のような対面角がそれぞれ 90° 、 130° である2種類の四角すいバイト、さらに実際の砥粒に比較的近いと思われるダイヤモンド三角すい図2(c)を切削工具として用意した。なおバイトの材質はいずれも高速度鋼SKH9である。

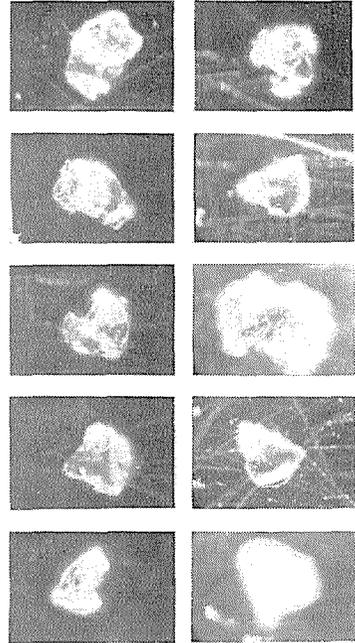


写真1 砥粒の形状 ($\times 120$)
(WA60PVA)

3. 切削量およびもり上がり切残し量

普通理論的切削量の値は所定の切込み深さをもった切刃が被削材の表面上を擦過し、その結果作られた溝の部分の材料がすべて切くずとなって除去されたものとして、その除去量を切削量として考える。

しかしながら上述のような考えから計算した切削量は実測値と一致せず、かなりの差異を生ずることが知られている。この差異は切刃によって作られた溝の部分が全部切くずと

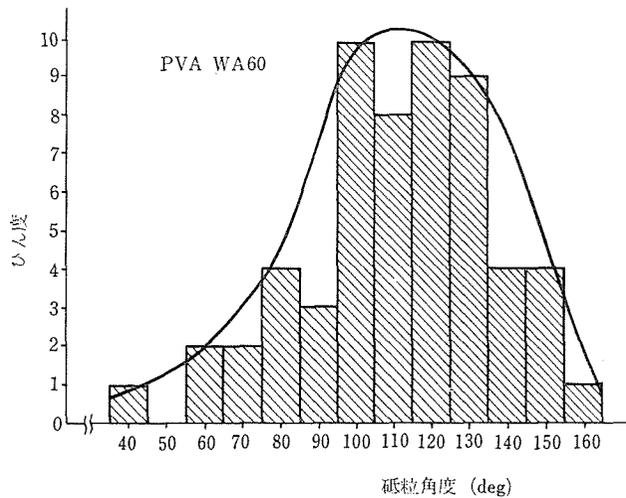


図1 砥粒切刃の角度分布

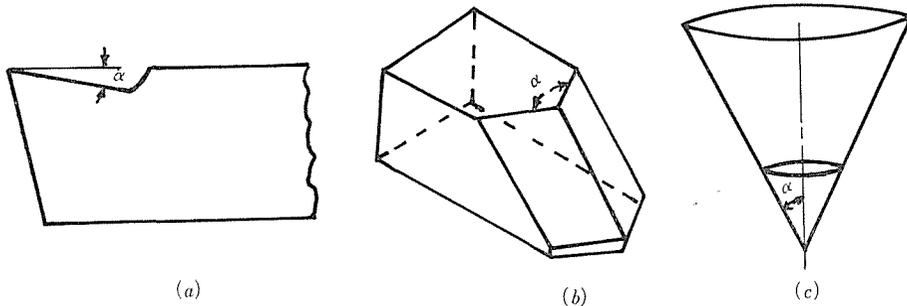


図2 切刃模形

して除去されるのではなくして、実際の場合は切くずとなるべき材料が溝の両側にもり上がるためであり、砥粒切削の場合は特に顕著な現象で、これについてもすでに2~3の研究が報告されている(5~6)。

普通砥粒切刃は不規則な形状であるが松井ら⁽⁷⁾はこれを円すい状、または球状をなすものと仮定し切削量を求める理論式を導びき出している。また筆者は本実験で使用する四角すいバイトによる切削量を理論的に求める式を松井らの考え方をもとにして導びいた。本報ではこれらの式から理論的切削量を計算している。

3-1 理論的切削量 W_{th}

(i) 切れ刃が円すい状をなす場合

超仕上のような比較的切削速度が低速の場合(20~100m/min 以内)単粒の切削作用は引っかき作用と同様に考えてよく、また単粒引っかきにおける接触部の応力状態は単粒の静的な押し込みによる圧子のまわりの応力状態によく似ていることをもとにして単粒による切削量を求めている。

図3(a)のように完全な平面に円すい角 2α の砥粒が押し込まれ、この砥粒の移動によって、その圧痕だけの体積が削りとられるものとする、切削量 W_{th1} は次式で示される。

$$W_{th1} = S_1 L \rho = 0.64 L \rho \cot \alpha \frac{q}{P_m} \quad (1)$$

ただし

$$S_1 = \frac{b_1^2}{4} \cot \alpha \quad (2)$$

また

$$P_m = \frac{8q}{\pi b_1^2} \quad (3)$$

(ii) 切れ刃が球状をなす場合

図3(b₁)の場合であるが、この場合の切削溝の断面積 S_2 は図3(b₂)のような二次曲線に近似して求めると、

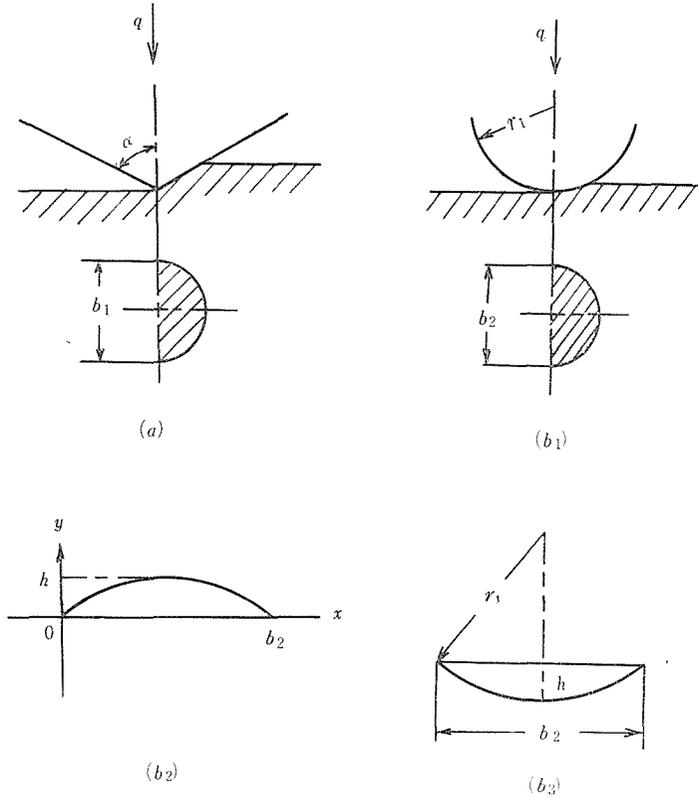


図3 切削楔形により削りとられる断面積

$$\begin{aligned}
 S_2 &= \int_0^{b_2} \left(\frac{4h}{b_2}x - \frac{4h}{b_2^2}x^2 \right) dx \\
 &= \frac{2}{3}b_2h
 \end{aligned} \tag{4}$$

この式の h を図3(b₃) の r_1 に近似すると

$$S_2 = \frac{b_2^3}{12r_1} \tag{5}$$

また P_m は円すいの場合と同様に考えて

$$P_m = \frac{8q}{\pi b_2^2} \tag{6}$$

したがって切削量 W_{th2} は次式であらわされる。

$$W_{th2} = S_2 L \rho = 0.34 \rho \frac{L}{r_1} \left(\frac{q}{P_m} \right)^{3/2} \quad (7)$$

ここで

P_m : 砥粒の静的押し込みによる平均圧力

q : 砥粒一個にかかる荷重

b_1, b_2 : 引っかけ溝の幅

ρ : 試料の比重

L : 切削重さ

なお P_m については砥粒が試料面に貫入すると加工硬化しない材料については $P_m = C_\alpha Y$ (ただし Y は試料の単純引張の弾性限) が成立ち C_α は α , r , によって変わるが, すでに Hill⁽⁸⁾ らは加工硬化を受けた銅について実験をおこない, $\alpha = 60 \sim 90^\circ$ の範囲で $3.6 \sim 2.9$ となり, 近似的に $C_\alpha = 3$ であると報告している. また P_m とビッカス硬さ H_V との関係は $P_m = 1.08 H_V$ として知られているので, 本報での計算はこの関係を採用して, それぞれの試料の場合の P_m の値を求め計算をおこなっている.

(iii) 切刃が四角すいバイトの場合

本報でおこなった切削実験はすべて旋削と同様な方法でおこなっている. すなわち円筒状試料の円筒外面を刃物台に取りつけた模形切刃によって所定の切込みを与え切削する方式である.

そこで筆者は四角すいバイトにより, 試料一回転当りの切削量を図4に示すような断面積 S_3 がバイトにより削りとられるものとして理論的な切削量を求める式を導いた. 図よりあきらかのように,

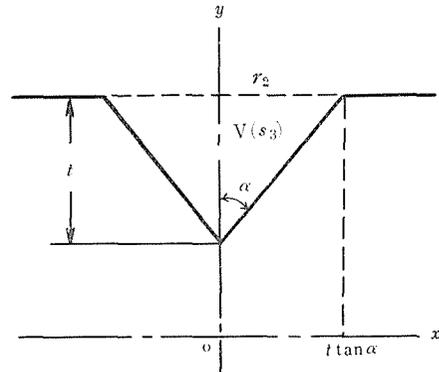


図4 四角すいバイトにより削りとられる断面積

$$V_1 = 2\pi r_2^2 t \tan \alpha \quad (8)$$

$$V_2 = 2\pi \int_0^{t \tan \alpha} \{ \cot \alpha \chi + (r_2 - t)^2 \} d\chi$$

$$= 2\pi t \cdot \tan \alpha \{ t^2/3 + t(r_2 - t) + (r_2 - t)^2 \} \quad (9)$$

ただし

r_2 : 試料の半径

t : 切込み深さ

ここでは, $t \ll r_2$ であると考えてよいので, 切削部分の体積 V は次式で示される. すなわち

$$\begin{aligned} V &= V_1 - V_2 \\ &= \pi d t^2 \tan \alpha \end{aligned} \quad (10)$$

d : 試料の直径

したがって切削量 W_{th3} は

$$W_{th3} = \rho V = \pi \rho d t^2 \tan \alpha \quad (11)$$

ただし ρ は試料の比重で 18—8 ステンレス鋼, S45C のそれはそれぞれ 7.19, 7.85 である.

3-2 もり上がり量について

切削時のもり上がり現象についてはすでにのべたように, 理論的に求めた切削量 W_{th} と, 実測した切削量 W_m との関係は次のようにあらわすことができるとした場合に, (12) (13) (14) 式の C_1, C_2, C_3 をもり上がり係数と呼ぶ.

i 切刃が円すいの場合

$$W_{m1} = \frac{1}{C_1} W_{th1} \quad (12)$$

ii 切刃が球状の場合

$$W_{m2} = \frac{1}{C_2} W_{th2} \quad (13)$$

iii 切刃が四角すいバイトの場合

$$W_{m3} = \frac{1}{C_3} W_{th3} \quad (14)$$

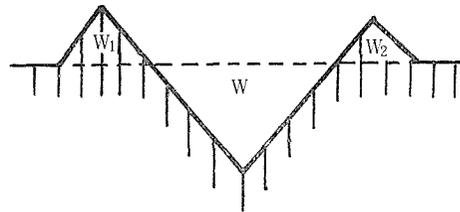


図5 もり上がりが生じたときの切削部分 (模形図)

もり上がりが生ずるときの切削部分の形状を模形的に示すと図5のようになる. ここで W は理論的に計算し得る切削量, $W_1 + W_2$ がもり上がり切り残し量である. 両者の比, すなわち

$$\xi = (W_1 + W_2)/W \quad (15)$$

ξ を比もり上がり切り残し量と定義しているが, $\xi = 1$ のときは切くずは全然除去されず, また $\xi = 0$ のときはもり上がり切り残しはまったくないことを意味する.

本報では切削量の実測値は試料の実験前後における重量減を精密自動天秤 (島津製作所製 L 形) により秤量し求めている.

3-3 切刃形状が比もり上がり係数におよぼす影響

切刃形状がそれぞれ異なる 4 種類の切削工具で切削速度, 切込み, を変化させて, 比もり上がり係数におよぼす切削条件の影響を検討した.

図 7~8 は切削速度 V ともり上がり係数 ξ との関係を実験により求めたものの一例である. 求めた結果から云えることは, 切刃角の大きいものほど, 比もり上がり係数の値は大

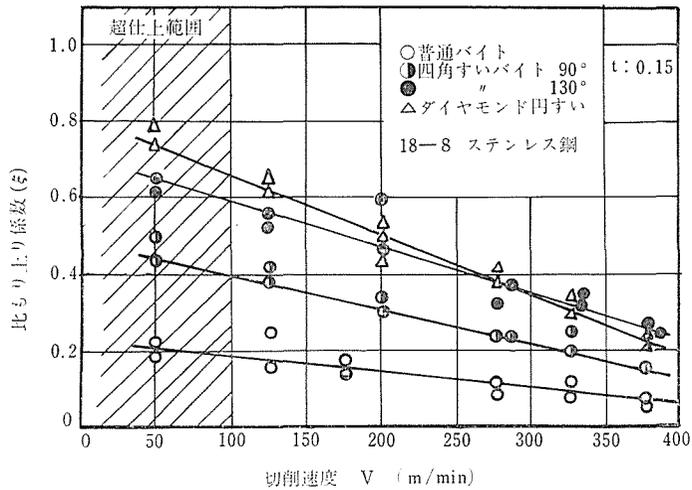


図6 比もり上がり係数と切削速度との関係

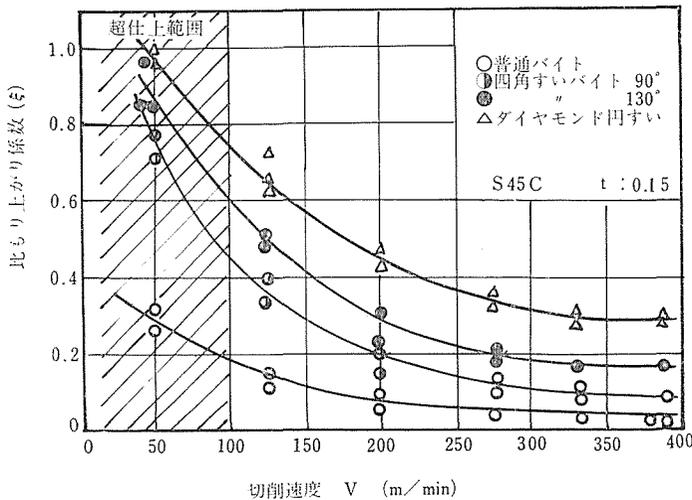


図7 比もり上がり係数と切削速度との関係

きくなっている。またこの値は切削速度によりいちぢるしく影響され、 $V-\xi$ 曲線の傾向は18-8ステンレス鋼の場合には実験をおこなった全切削速度域で ξ の値はほぼ直線的に減少している。これに対してS45Cの場合は低速域で ξ の値が非常に高く、とくに切刃角の大きい工具の場合には ξ の値は1に近い。このことは切刃によって除去されるべき材料がすべて溝の両側にもり上がり、切くずはほとんど出ないことを意味している。この $V-\xi$ 曲線の傾向から考えられることは、切刃角の大きな砥粒による切削でも切削速度の高い、いわゆる普通おこなわれている研削加工では、もり上がり切残し量はかなり少なくなるが、

本報で取扱っている超仕上は切削速度が大体 20~100m/min の範囲でおこなわれているのでその値は異状に高く、この点では研削速度が非常に高い研削加工とは異なった仕上面の生成過程を経ていることが考えられる。

4. 模形切刃による最大傾斜角と切削抵抗値との関係

超仕上の場合仕上効果にもっとも影響を与える加工条件として、最大傾斜角 θ と研削速度 V があげられる。したがって前報⁽⁹⁾では砥石を使った場合、この θ と V をパラメータにして諸量の値を求めているが、この場合超仕上抵抗の解析方法として、砥石を構成する砥粒切刃一個をとり出し、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いう仮定にしている。そこで本報では実際に単粒（ダイヤモンド模形切刃）を使い、 θ を0~72°まで変化させそのときの切削抵抗を求めた。その結果を図8に示す。この結果は前報⁽⁹⁾の図13（最大傾斜角と研削抵抗との関係）とまったく同じ傾向を示した。このことは上述した仮定が定性的には正しいことを示唆するものであろう。

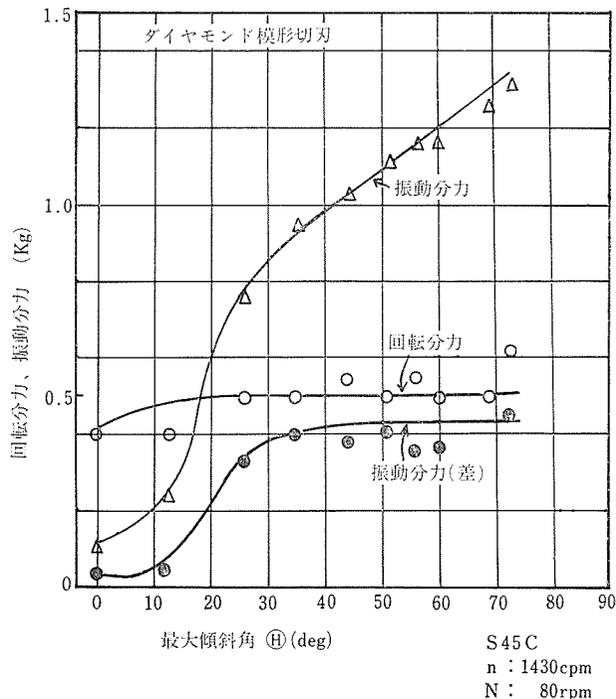


図8 模形切刃による最大傾斜角と切削抵抗との関係

5 模形切刃による運動軌跡

超仕上加工における砥粒の仕上面生成の過程を考察するために本報ではダイヤモンド模

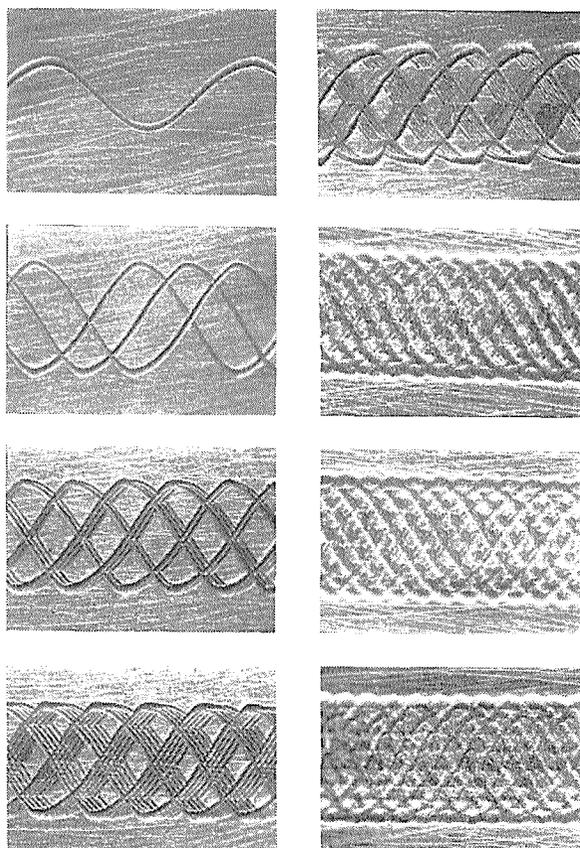


写真2 単粒の運動軌跡

形単粒 ($2\alpha = 130^\circ$) を用い、砥粒の運動軌跡を観察した。

実験方法は S45C の円筒状試料の円筒外面に単粒を所定の圧力で押しつけ、試料を低速で回転すると同時に単粒に振動を与えて、超仕上と同じ機構で両者に相対運動をおこなわせ、試料表面に描かれた切刃の運動軌跡を観察した。

写真2は試料を1回転させたところで切込みを中止したものを1周、2回転したところで切込みを中止したものを2周、として表示してある。なお75周は前報⁽⁹⁾の砥石による超仕上実験で、平均切削長さを10 μ mとしてデータの整理をしたが、これに相当する切削長さである。この写真からあきらかのように切削が進むにつれて切削溝は交叉する切削溝と干渉し合い、材料の互いのもり上がりは次の切刃の通過によって押しならされ、もり上がって加工硬化した部分は、あたかも摩もろ粉のような形で除去されてゆく様子がうかがはれる。75周の写真はすでに運動軌跡がはっきりせず、仕上面に近い状態になっている。

結 論

砥石による仕上面生成の過程を検討するために砥石を構成している砥粒に注目し、砥粒

切刃に相当する模形切刃を使用して砥粒切削の特異性を実験によりたしかめた。その結果を要約すると次のようである。

1) PVA砥石からWA60砥粒をとり出し、その切刃角度の分布をとった。その結果、砥粒の切刃角は大体 $100^{\circ}\sim 130^{\circ}$ であり、負のすくい角をもつことがたしかめられた。

2) 切刃角の異なる模形切刃を用いて、切削実験をおこなった結果、比もり上がり係数は切刃角の大きいもの程大きく、また切削速度の上昇につれて減少する。この傾向は被削材を変えても定性的には変わらない。

3) 模形切刃を用いた場合の最大傾斜角と切削抵抗との関係は、砥石によって求めた値とその傾向は一致する。これは一個の砥粒切刃に作用する力を考え、砥石の場合はこの力に同時切削砥粒数を乗じたものであるという解釈をしているが、この仮定が成立つことを示唆するものである。

終りに本研究をおこなうに当り、始終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文部技官田野口陸氏、当時卒研究生であった沖村俊章氏（信濃絹糸紡績 K. K.）、柴田暁範氏（大同製鋼 K. K.）に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) F. P. Bowden and D. TABOR: The Friction and Lubrication of solids, Oxford, Clarendon press, P 90.
- 2) 佐々木外喜雄, 岡村健二郎: 日本機械学会論文集, 26-1631 (1960-3), 394.
- 3) 大越諄, 吉川弘之, 佐田登志夫: 精密機械, 25-10 (1959), 525.
- 4) 佐藤健児: 精密機械, 17 (1951), 88.
- 5) R. HILL: The Mathematicae Theory of plasticity, (1950), 210.
- 6) 松井正己: 精機学会講演会前刷, (1962-4), 77.
- 7) 中里昭三, 松井正己: 超仕上作業とその原理, 養賢堂, (1964).
- 8) R. F. Bishop, R. Hill, N. F. Mott: Prot. Phys. soc., 57, (1945), 147.
- 9) 佐藤元太郎: 砥粒切刃による仕上面生成機構に関する研究, 信州大学工学部紀要, 32, (1972) 111.

Summary

Studies on the Cutting Mechanism of Abrasive Grain (2)

Mototaro SATO

(Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering)

Being continued from the previous report, in this paper the author has studied on the process of formation of the generated surface by using a single point cutting tool which has a pyramidal shape with a large vertex angle or a conical shape as in the case of the abrasive grain.

According to the experimental result, a certain portion of the metal concerned with the deformation by the cutting tool is removed as the chip and the rest remains on the both sides of the groove or the track of the cutting edge as the swell-up.

The volume of swelling-up becomes larger in accordance with the increase of the cutting edge angle and smaller in accordance with the increase of the cutting speed.

Owing to the fact, the cutting mechanism of superfinishing in the range of 20~100 m/min at cutting speed is essentially different from that of grinding.