



Title	微小切削の過渡特性について（第2報）：工具と被削材の接触状態
Author(s)	勇田, 敏夫; Yuta, Toshio
Citation	北海道大學工學部研究報告, 65, 31-39
Issue Date	1972-12-16
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/41103">https://hdl.handle.net/2115/41103</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	65_31-40.pdf



# 微小切削の過渡特性について (第2報)

— 工具と被削材の接触状態 —

勇 田 敏 夫\*

(昭和47年4月28日受理)

## On the Transitional Phenomena of Micro-Cutting (2nd Report)

— The State of the Contact between the Tool-Edge  
and the Surface of a Work-piece —

Toshio YUTA

### Abstract

In a previous paper, in order to grasp the essentials of the phenomenon at the beginning of cutting, experiments were carried out on orthogonal-cutting with a gradual increasing depth of cut using carbon steel as the specimen.

In this paper, an analysis is presented on the mechanism of contact between the tool-edge and the surface of a work-piece. Applying this analysis, the state of contact in the rubbing region, the contact rate against the factors; rigidity of machine, the rate of increasing depth of cut, the tool-edge roundness, was obtained experimentally.

The experimental date shows that the decrease of the surface roughness in the previous rubbing region has a linear relation to normal force, and it is suggested that the transition to ploughing is not influenced by the rate of contact between the tool-edge and the surface of a work-piece.

### 1. 緒 言

微小切削において切込み量が微小であるため、切削現象が種々の要因により支配される<sup>1)~4)</sup>が、特に切削開始までの過渡現象が微小切削現象を支配する大きな要因となっている。

前報<sup>5)</sup>では切削初期に生じる諸現象を観察するため、切込み量が零から次第に増加する方式の二次元切削を行ない、現象間の相異ならびに種々の要因による過渡現象の遷移条件などを実験的に求めた。

切削初期において工具が被削材と接触してから切削を始めるまでの間の過渡現象は、ラビング領域とほりおこし領域とに分けられ、ラビング領域では摩擦現象が支配的であり巨視的には弾性現象であるが、ほりおこし領域では塑性現象である。ラビング領域において工具と直接接触する被削材表面は、マイクロ高圧塑性現象によりあらさの突起が塑性流動し、工具の進行にともない真実接触面積が増大する。この工具と被削材の接触状態は工具と被削材の摩擦現象や摩擦現象の重要な一要因であり、切削初期の現象遷移に大きな影響を与えるものと考えられる。

\* 精密工学科 精密加工学第二講座

したがって本報は、工具と被削材表面の接触状態を理論的に解析し、前報と同様な切込み漸増方式の乾式二次元切削を行ない、切削初期における工具と被削材の接触状態を調べ、これらの遷移条件に及ぼす影響を実験的に求めたのでここに報告する。

## 2. 工具と被削材表面の接触状態の解析

今切込み漸増方式の二次元切削において、法線力  $f_n(X)$  は次式により与えられる。

$$f_n(X) = k_a \cdot \dot{\gamma} \cdot X_r \quad (1)$$

ここで  $k_a$ ; 動力計のばね定数,  $\dot{\gamma}$ ; 切込み増加率,  $X_r$ ; ラビング長さ

したがってラビング領域内で法線力  $f_n$  は切削距離 (ラビング長さ) に比例して増加する。切削工具の刃先はある有限な丸味を持つため、切削初期において工具と被削材の接触状態は、円柱と平面の接触問題に近似出来る<sup>3)</sup>。ラビング領域は巨視的に見て弾性領域なので、工具と被削材は弾性接触しており、その接触弧を  $2l_x$ 、被削材の幅を  $b$  とすると、みかけの接触面積  $A_a$  は

$$A_a = 2 \cdot l_x \cdot b \quad (2)$$

となる。しかし図1で明らかなように工具と実際に接触するのは、被削材表面あらさの先端付近であり、それらの接触面積はきわめて小さいので荷重の大きさのいかんにかかわらず接触部分は塑性変形している<sup>6)</sup>。ラビング領域のプロファイルを観察するとあらさの山が削られ、またはつぶされたりして平坦化された状態が明らかにみとめられる<sup>2)</sup>。工具が接触する被削材表面では

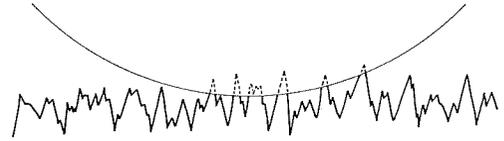


図1 工具先端と被削材表面の接触

マイクロ高圧塑性現象が支配的なため、あらさの山の弾性変形と横方向のあらさの突起の塑性変形を無視出来ると考えると、プロフィールにあらわれているあらさの山の平坦部分は工具と被削材の真実接触部分をあらわす。したがってこのプロフィールの Abbott の負荷曲線を求めると工具と被削材の接触状態が量的に得られる。

一般に被削材の前加工面は機械加工されており、その表面あらさの分布は正規形に近いものが多い<sup>7)</sup>。今あらさ曲線の分布形を正規形とすると、

$$\phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma} \right)^2 \right\} \quad (3)$$

により表面あらさの確率密度が与えられる。ここで  $y$  はあらさの中心からの距離、 $\sigma$  は標準偏差である。

したがってこのあらさ曲線の Abbott の負荷曲線は次式により求められる。

$$\Psi(y) = \int_{-\infty}^y \phi(y) dy = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^y \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma} \right)^2 \right\} dy \quad (4)$$

上述のように工具が被削材の表面あらさの先端で接触している場合、荷重が増大すると接触突起の数も増加し接触面積 (真実接触面積) も増大する。したがって真実接触面積を  $A_r$ 、降伏応力  $P_m$  とすると、(1) 式の法線力  $f_n(X)$  は

$$f_n(X) = P_m \cdot A_r \quad (5)$$

であらわせられる。ここで真実接触面積  $A_r$  を求めるため Abbott の負荷曲線を三次元に拡張し、見かけの面積  $A_a = 2l_x b$  で接触している場合の真実接触面積  $A_r$  は

$$A_r = 2 \int_0^b l_x \frac{\lambda(y)}{\lambda(-m\sigma)} dz = 2 \cdot l_x \cdot b \frac{\lambda(y)}{\lambda(-m\sigma)} \quad (6)$$

となる<sup>8)</sup>。

ここで  $m$ ; 表面あらさと加工方法により決まる定数

$$\lambda(y) = \int_y^{m\sigma} \phi(y) dy \doteq \int_y^{\infty} \phi(y) dy$$

今,  $\lambda(-m\sigma)=1$  になるようにすると, 近似的に

$$\begin{aligned} \frac{\lambda(y)}{\lambda(-m\sigma)} &= \int_y^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} y^2 \right\} dy \\ &\doteq 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} y \end{aligned}$$

となる。したがって (5) 式は

$$f_n(X) = 2P_m b l_x \frac{\lambda(y)}{\lambda(-m\sigma)} = 2P_m b \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} y \right) l_x \quad (7)$$

上述のようにラビング領域では工具切れ刃が被削材表面を上すべりするため, 切れ刃に丸味を持つ工具と被削材の接触状態は巨視的に見て被削材の平面上を工具の円柱が滑る場合に近似出来る。したがって弾性接触論<sup>9)</sup> から接触弧  $l_x$  は

$$l_x = \alpha \sqrt{R \cdot f_n(X)}$$

ここに  $\alpha$ ; 被削材, 工具の物性による定数,  $R$ ; 工具切れ刃先端半径 (mm)

したがって (7) 式は

$$f_n(X) = 2P_m b \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} y \right) \alpha \sqrt{R \cdot f_n(X)} \quad (9)$$

ここで  $2\alpha P_m b \sqrt{R} = B$ ,  $1/\sqrt{2\pi} \sigma = C$  とすると (9) 式は

$$f_n(X) = B^2 (1 - Cy)^2$$

$y$  は  $B, C$  に比して小さいので

$$f_n(X) \doteq B^2 (1 - 2Cy) \quad (10)$$

となる。すなわちラビング領域では工具の上すべりが進むと法線力が直線的に増加するが, 被削材の表面あらさは直線的に減少して, 真実接触面積が増加する事を (10) 式が示していると考えられる。

つぎにラビング領域における被削材表面あらさの減少状態について考察すると 図2 に示されるように, 測定長  $L_R$  間で表面あらさが  $H_1$  に減少したとする。今中心線から任意の距離  $y$  における切断部の長さ  $x$  は

$$x = \left( \frac{H-y}{H-H_1} \right) L_R \quad (11)$$

であるから Abbott の負荷曲線は次式であらわされる。

$$\phi(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} \int_{-\infty}^y \left( \frac{H-y}{H-H_1} \right) \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma} \right)^2 \right\} dy \quad (12)$$

図3 は, (12) 式に前報で求めた仕上面のあらさ曲線を用い, 適当な  $H_1$  の値を代入して得られた Abbott の負荷曲線である。実際のラビング面のあらさ曲線から Abbott の負荷曲線を求め

るとその曲線から図4で示されるように適当な、あらしの減少状態がつまり表面の接触状態が判別される。

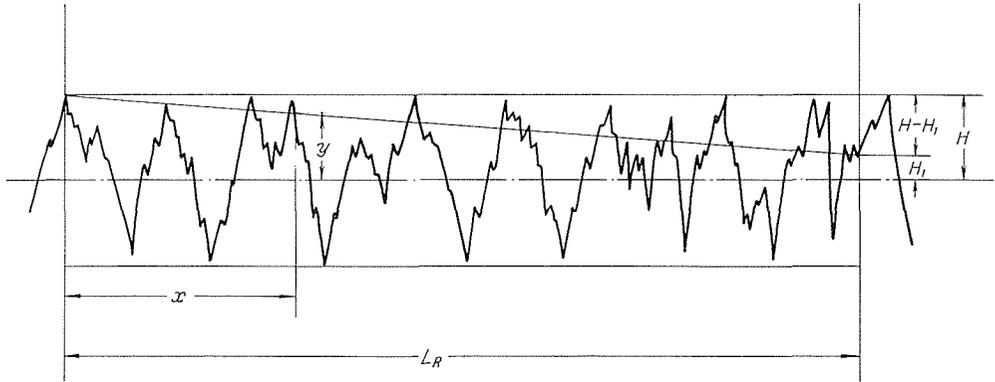


図2 任意の接触状態におけるあらし曲線

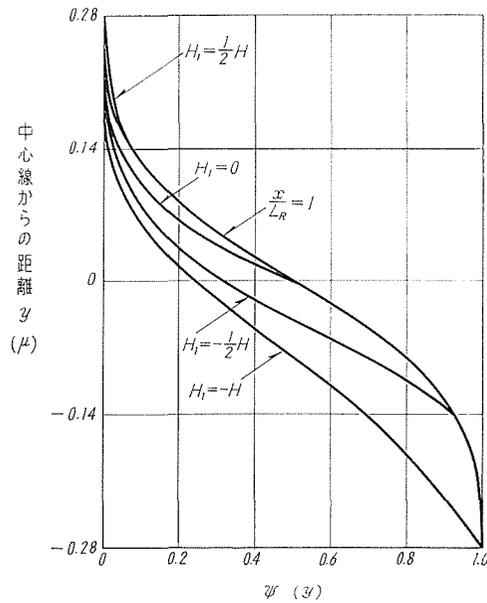


図3 各接触状態の負荷曲線

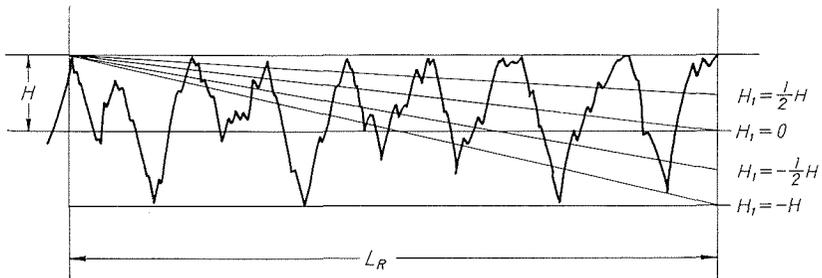


図4 各接触状態のあらし曲線

### 3. 実験装置と実験方法

実験は炭素鋼 (S50C) を被削材として、切込み漸増方式の乾式二次元切削を行ない、工具と被削材の接触状態を求めめるため、表面検査機で切削面のプロフィールを測定した。

#### 3.1 切削実験

実験装置と実験方法は前報と同様であり、切削速度も現象観察を容易にするため低速の  $V=25$  mm/min を使用した。実験条件は工具切れ刃先端半径、切込み増加率と剛性を変化させた。すなわち工具は前報と同様に超硬チップ (S1) をシャンクにろう付けして、すくい角  $0^\circ$ 、逃げ角  $30^\circ$ 、切れ刃先端半径  $R=0.022, 0.055, 0.085, 0.11$  (mm) の4種類を使用した。切込み増加率  $\gamma$  の設定は載物台の傾斜を適当に変え、 $\gamma=1.75, 6.50, 10.0, 17.7$  に設定した。また剛性は動力計のばね定数  $k_a$  を変化させ、 $k_a=0.44, 0.64, 1.52, 6.0$  ( $\times 10^{-3}$  kg/mm) とした。

被削材表面の前加工は、前報と同様に #3000 のアランデム砥粒でラップ仕上げを行ない、 $H_{\max} \cong 0.28 \mu$  になるよう統一した。

#### 3.2 断面曲線 (プロフィール) の測定と表面の表示

切削面のプロフィール測定は小坂式 SE-3 型万能表面形状測定機を用い、縦倍率 10,000 倍、横倍率 100 倍で記録した。測定値は切削方向に平行に数本のプロフィールをとって測定した値を平均して求めた。ただし後述する接触率の測定の場合は、切削方向に直角に記録したプロフィールを用いた。

表面の表示<sup>10)</sup>として前述した Abbott の負荷曲線を用いた。Abbott の負荷曲線は触針法で記録されたプロフィールからも図式的に求められる。すなわちプロフィールから一定長さ (JIS で規定された長さ、またはラビング長さ) をとり、最大高さ  $H_{\max}$  を 10~20 等分するような平行線を基準線 (中心線) に平行に引いて、各平行線がプロフィールにより切りとられる長さの和を求めると Abbott の負荷曲線が得られる。負荷曲線を描く場合、測定されたプロフィールは日本光学の万能投影機で更に 10 倍に拡大される。

工具と被削材の接触を量的にあらわす接触率  $\psi$  は、切削方向に直角なプロフィールの Abbott の負荷曲線から求めた<sup>10)</sup>。また切削面の観察は光学顕微鏡と日本電子製スーパー・スコープを使用した。

### 4. 実験結果と考察

#### 4.1 表面あらさの分布状態

前章で被削材の表面あらさを正規分布と仮定して、工具と被削材の接触状態の理論解析を行なったが、この仮定の妥当性を確かめるため被削材表面のあらし曲線を測定しそのあらしの負荷曲線を求めた (図5)。図5で縦軸はあらしの基準線からの距離をあらわし、実線で画かれている曲線は測定値に近いと考えられる正規分布の曲線であ

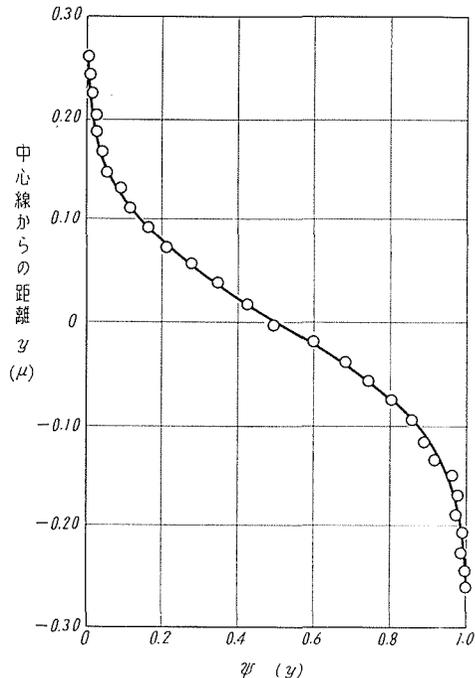


図5 表面あらしの負荷曲線

る。図に示されているように測定値は正規分布の負荷曲線とよく一致しており、被削材の表面あらかの分布は正規分布性があることが確認された。

## 4.2 工具と被削材表面の接触状態

### (1) ラッピング面の顕微鏡観察

前報で述べたように、切削初期にはラッピング領域が存在し、更にラッピング領域を詳細に観察すると前期と後期に分けられあらか曲線も前加工とかなり異なっている。ラッピング領域内の接触部分の状態を顕微鏡観察した結果を図6に示す。図6(a)は工具切れ刃先端半径  $R=0.11\text{ mm}$ 、ばね定数  $k_d=0.64\times 10^3\text{ kg/mm}$ 、切込み増加率  $\gamma=1.75\%$  の条件でラッピング前期から後期への遷移領域の写真であり、(b)はラッピング後期からほりおこし領域への遷移領域の写真である。写真中で白く写っている部分が接触部であり(a),(b)で判るように明らかに接触状態が異なっている。写真を更に拡大し多数の平行線を引いて、その線が白く写っている部分を横切る割合をとって接触率を求めると(a)では約0.45,(b)は約0.7が得られ、ラッピングが進むにつれて接触率が增大する事を示している。更にこの各領域の表面を電子顕微鏡で詳細に観察すると(図7)、ラッピング前期(図7(a))はあらかの凹凸が部分的に平坦化され、いくぶんラッピング方向に広がっていきさほど大きくないが、ラッピング後期では(図7(b))、ラッピング方向への伸びが大きくなっている。したがってラッピング後期のプロフィール観察は可成りの誤差が入る事が考えられる。

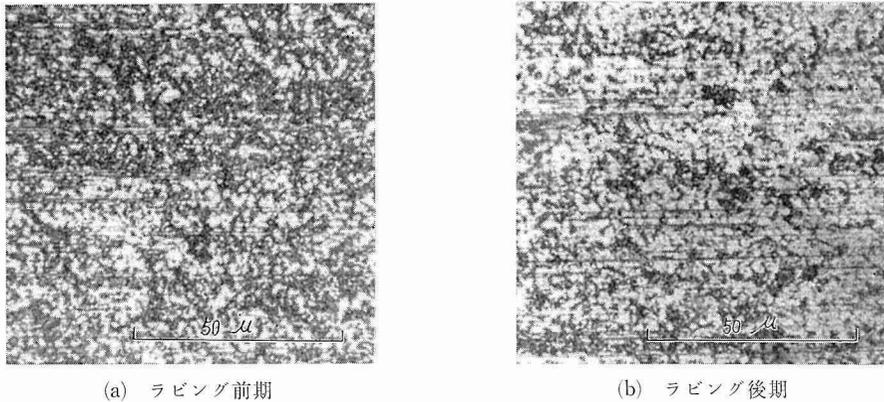


図6 被削材の顕微鏡写真

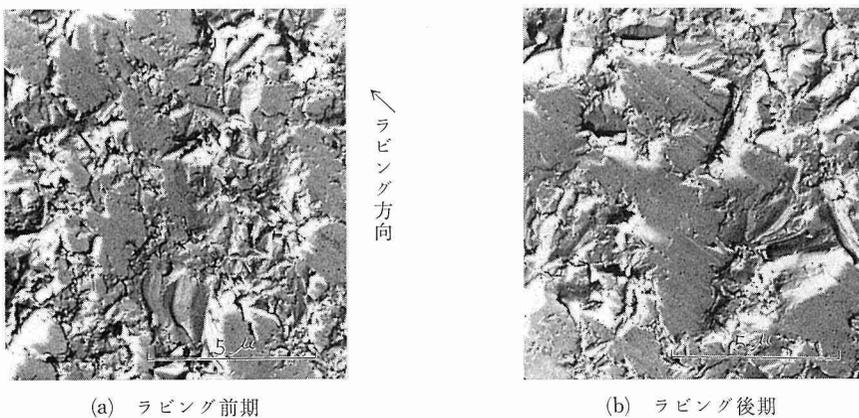


図7 被削材表面の電子顕微鏡写真

### (2) ラッピング前期における接触状態

はじめにラッピング方向に平行なプロフィールをとり接触状態について調べた。図8は  $k_d = 0.64 \times 10^3 \text{ kg/mm}$ ,  $\gamma = 1.75\%$  における工具と被削材の接触状態をあらわしている。実線は(12)式に  $H_1 = 0$ ,  $-\frac{1}{2}H$ ,  $-H$  の値を代入して得られた曲線である。工具切れ刃先端半径  $R$  が大きい  $R = 0.11$ ,  $0.085$  (mm) では  $H_1 = 0$  の曲線にほぼ一致するが、 $R$  が小さくなると  $H_1 = -\frac{1}{2}H$  の曲線に移行している。すなわちラッピング初期における工具と被削材の接触状態は図4から、切れ刃先端半径が大きいと接触点のあらさ先端から、ラッピング前期の終りにおいてあらさ  $\frac{1}{2}H_{\max}(H=0)$  まで直線的にあらさが減ってゆすが、 $R$  が小さいと最終のあらさが  $-\frac{1}{2}H$  に近づくと考えられる。

つぎに接触状態を量的にあらわすため、現象の遷移領域においてラッピング方向と直角なプロフィールをとり、負荷曲線を描き接触率を求めたのが図9である。図9は接触率  $\eta$  と工具切れ刃先端半径  $R$  との関係である。 $R$  が大きいと  $\eta$  はほぼ0.5を示すが  $R$  が小さくなると漸次  $\eta$  が大きくなり上述の事がうなづけられる。また  $R$  が大きいければお定数  $k_d$  の値による影響が出ているが  $R$  が小さいと  $k_d$  に無関係になる。図10は接触率  $\eta$  と切込み増加率  $\gamma$  の関係で、 $\gamma$  が増加するにしたがい  $\eta$  も増大している。

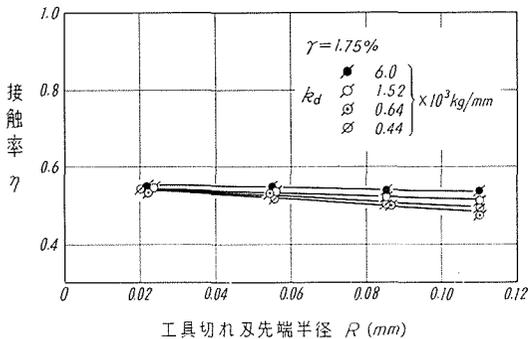


図9 接触率と工具切れ刃先端半径の関係

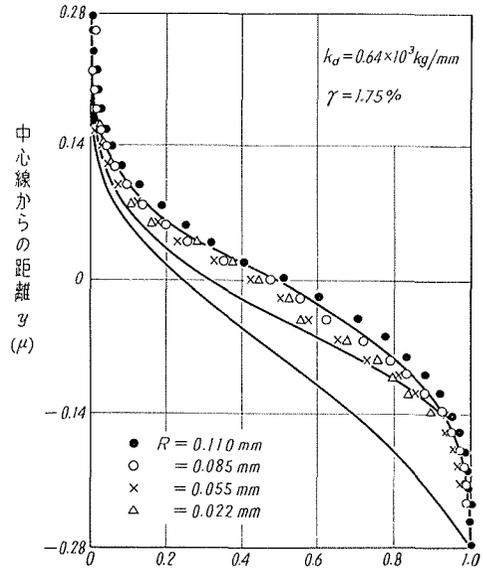


図8 ラッピング前期における工具と被削材の接触状態

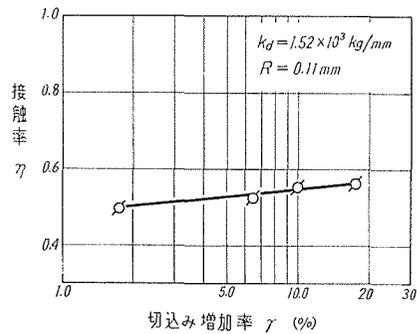


図10 接触率と切込み増加率の関係

### (3) ラッピング後期における接触状態

ラッピング後期において図6で示されるように、前期と比較して接触率が增大しており接触状態が異なっている。図11は  $R = 0.11$  mm,  $k_d = 0.64 \times 10^3 \text{ kg/mm}$ ,  $\gamma = 1.75\%$  の条件におけるラッピング方向と平行にとったプロフィールから得られた負荷曲線である。実線はラッピング前期においてあらさが  $\frac{1}{2}H$  に減少するので図4の  $H_1 = 0$  から上を削除した負荷曲線である。ラッピング後期の初めの領域は工具が被削材表面あらさ  $H_1 = 0$  を擦過しているが、漸次あらさが減少してゆくと考えられる。図で破線部分の実測値が右側に大きくふくらんでいるのは、電子顕微鏡観察で明らかのように、ラッピング後期において被削材表面あらさの凹凸の平坦化が増大し、マイクロ高圧に

より塑性変形した流動物がラビング方向に大きく移動するので、接触時のラビング方向の正しいプロフィールが得られないためと考えられる。ラビング方向と直角なプロフィールは上述のような誤差が入らないので接触率の正しい測定は可能である。図12は接触率 $\eta$ と工具切れ刃先端半径 $R$ の関係を示すが、 $\eta$ は $R$ に関係なく一定値約0.75を示している。図13は接触率 $\eta$ とばね定数 $k_d$

の関係で、 $k_d$ が増加するにしたがい $\eta$ が増大している。図14は接触率 $\eta$ と切込み増加率 $\gamma$ の関係を示し、ばね定数 $k_d$ と同様 $\gamma$ が増加すると $\eta$ が増大するが $k_d$ の影響より大きい。以上の実験結果

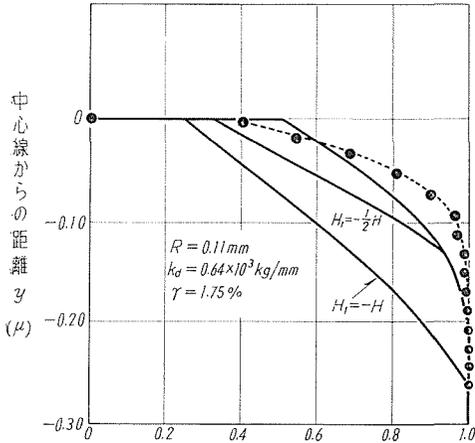


図11 ラビング後期における工具と被削材の接触状態

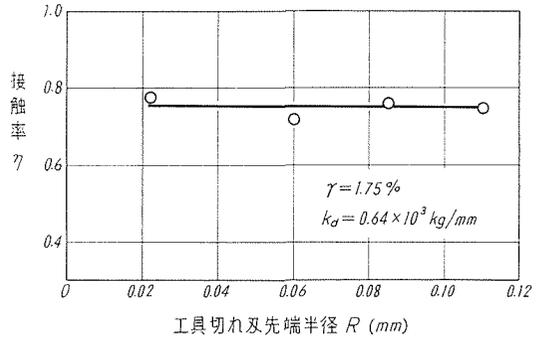


図12 接触率と工具切れ刃先端半径の関係

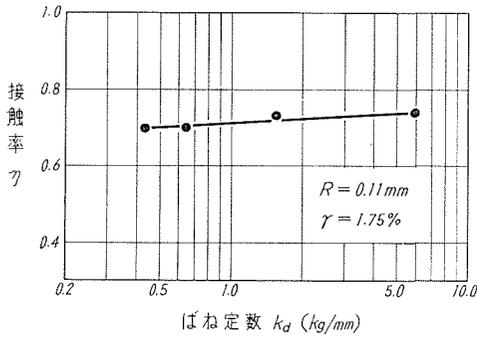


図13 接触率とばね定数の関係

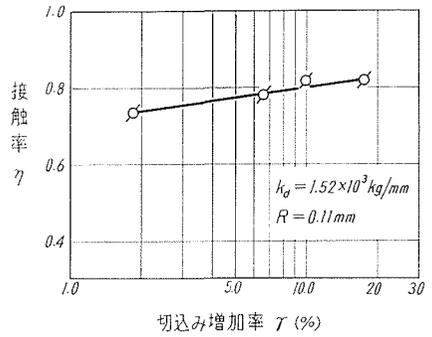


図14 接触率と切込み増加率の関係

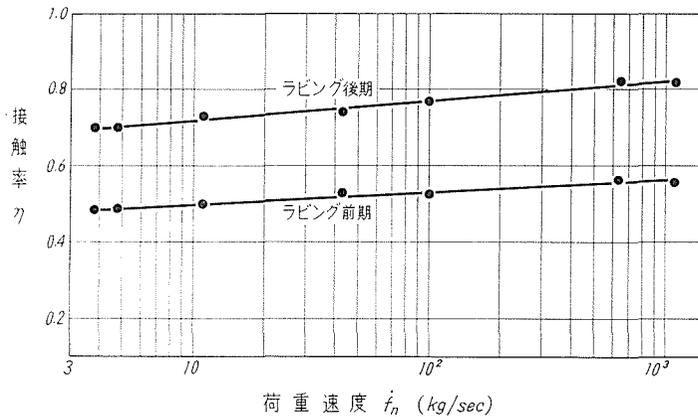


図15 接触率と荷重速度の関係

からつぎのことが考えられる。切削加工の初期現象に影響をおよぼす要因の中で、外的要因である工作機械系の剛性、切込み増加率などは荷重速度と同等の効果を与えると考えられる<sup>4)</sup>。したがってばね定数と切込み増加率の各要因を、荷重速度に換算して接触率 $\gamma$ との関係を求めたのが図15である。荷重速度が増加すると $\gamma$ も増大しており明らかに荷重速度の影響をあらわしているが、前報で述べたように臨界法線力 $f_n$ に対する効果より大きくない。また図9で示したラビング前期において $\gamma$ と $R$ の関係はあまり大きくなく、後期にいたっては全く無関係である(図12)ことから、ラビング前期から後期への遷移、ならびにラビングからほりおこしへの現象の遷移は被削材の内部応力状態に影響され、被削材の内部から現象遷移が生ずる<sup>3)</sup>ことのうらづけになると考えられる。

## 5. 結 言

切削初期における工具と被削材表面の接触状態を解析し、切込み漸増方式の乾式二次元切削を行ない、工具と被削材の接触状態ならびにこれらの切削初期現象の遷移条件に及ぼす影響を実験的に求めた結果つぎのことからがわかった。

(1) ラビング前期における工具と被削材表面の接触状態は、表面あらさは漸次直線的に減少するが、工具切れ刃先端半径が大きい場合遷移領域付近ではあらさはほぼ $\frac{1}{2}H_{\max}$ になり、先端半径が小になるとあらさは $\frac{1}{2}H_{\max}$ 以下になる。

(2) ラビング前期における工具と被削材表面との接触率は、ほぼ0.5~0.55付近で、工具切れ刃先端半径、剛性(ばね定数)ならびに切込み増加率の影響は大きくない。

(3) ラビング後期における工具と被削材表面の接触状態は、初めの領域は工具が被削材表面あらさ $\frac{1}{2}H_{\max}$ ( $H_1=0$ )を擦過しているが漸次あらさが減少してゆくと考えられる。

(4) ラビング後期における工具と被削材表面との接触率は、工具切れ刃先端半径に関係なく約0.75の一定値を示す。

(5) ラビング後期における接触率は、剛性と切込み増加率とに影響されるが、切込み増加率の影響が剛性より大きい。

終りに実験の遂行に協力された沢田亀久雄技官ならびに高橋義美技官、実験の一部に御援助された本学卒業生、武藤芳彦、吉田憲一郎の諸氏に深く感謝致します。

## 文 献

- 1) 勇田敏夫：砥粒加工，2 (1965)，9，p. 466.
- 2) 勇田敏夫：精密機械，35 (1969)，5，p. 292.
- 3) 勇田敏夫：精密機械，36 (1970)，3，p. 202.
- 4) 勇田敏夫：精密機械，37 (1971)，2，p. 93.
- 5) 勇田敏夫：北大工学部研究報告，第53号 (1969).
- 6) F. P. Bowden and D. Tabor: Friction and Lubrication of Solids, Oxford, 1950.
- 7) 本田 肇：精密機械，20 (1954)，2，p. 45.
- 8) 築添 正：機械学会論文集，32 (1966)，239，p. 1083.
- 9) たとえば H. Poritoky, Schenectady, N. Y.; Trans ASME, 72 (1950), 191.
- 10) 大矢根守哉・小坂田宏造：機械学会論文集，34 (1968)，263，p. 1336.