



# HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	微小切削の過渡特性について : 主にラビング現象について
Author(s)	勇田, 敏夫; Yuta, Toshio; 山本, 正興 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 52, 47-56
Issue Date	1969-03-20
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/40928">https://hdl.handle.net/2115/40928</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	52_47-56.pdf



# 微小切削の過渡特性について

— 主にラビング現象について —

勇 田 敏 夫\*

山 本 正 興\*

(昭和43年11月26日受理)

## On the Transitional Phenomena of Micro-Cutting

— On the Rubbing Phenomenon —

Toshio YUTA

Masaoki YAMAMOTO

(Received November 26, 1968)

### Abstract

At the beginning of cutting with abrasives or cutting tools, a phenomenon which no chips are formed because the tool-edge is rubbed appears.

In order to grasp the essentials of this phenomenon and to find the factors influencing the beginning phenomenon of cutting an experiment was carried out on low speed orthogonal-cutting with a gradual increasing depth of cut using carbon steel as the specimen.

The experimental data shows that the state of contact between the tool and workpiece, in the rubbing region the tool-edge comes in contact with the surface roughness of the workpiece, in the ploughing region the tool-edge comes fully in contact with the surface and in the cutting region it perfectly contacts with the bulk, and there is a critical normal force which has a linear relation to the tool-edge roundness at the stage when the rubbing phenomenon changes into ploughing phenomenon.

The critical normal force is influenced by the nature of the workpiece and rigidity of the machine tool.

### 目 次

1. 緒 言 .....	48
2. 実験装置と実験方法 .....	48
3. 実験結果と考察 .....	49
3-1. 過渡現象 .....	49

---

\* 精密工学科 精密加工学第二講座

(1) プロファイルと切削抵抗の変化 .....	49
(2) 表面観察 .....	50
3-2. 遷移条件 .....	53
(1) 工具刃先半径並びに被削材硬度の影響 .....	53
(2) 剛性の影響 .....	54
4. 結    言 .....	55

## 1. 緒    言

近年、精密加工の発展に伴ない、塑性加工における加工精度が向上したので、仕上加工としての切削加工の削りしろが減少し、さらに高精度加工の必要性が増大したため微小切削の重要性が増してきた。

微小切削において、切込みが微量であるため通常切削では無視しえた多くの因子、たとえば工具刃先半径<sup>1)</sup>、被削材表面層<sup>2)</sup>や被削材と工具材質の親和性<sup>3)</sup>などの影響が大きく、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。

一般に切削開始点の過渡時期には、切りくずを生成しないで砥粒や工具が被削材表面を擦過する上すべり現象が現われる。この上すべり現象はラビング領域とほりおこし領域に分けられ、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り容易に切削に転移する<sup>4),5)</sup>。切削加工の過渡現象は切削工具または砥粒による材料の微小破壊現象の一種と考えられ、ラビング現象からほりおこし現象への遷移、つまり質的に異なる現象への遷移はいろいろな要因に支配されるから、これらに影響を及ぼす多くの諸因子を的確に把握しなければならない。また奥島ら<sup>7)</sup>も指摘しているように切削加工の過渡現象を解明することは、工具のビビリの問題やフライス加工などの断続切削機構の解析、あるいは微小切削の諸問題に貴重な情報を提供すると考えられる。

本報においては、炭素鋼を被削材として切込量が零から次第に増加する方式の乾式低速2次元切削を行なって過渡現象を観察し、種々の要因による遷移条件を実験的に求めた結果を報告する。

## 2. 実験装置と実験方法

装置は立型フライス盤を使用し、被削材を取付けた載物台をテーブルに固着し、テーブル送りにより切削速度を与えた。現象観察を容易にするため低速の切削速度  $V=25 \text{ mm/min}$  を使用した。実験条件は夫々の要因にしたがい表1に示されるよう設定した。

フライス盤のスピンドル軸に固定した片持ばり型式の動力計に切削工具を取付け、抵抗線歪計と直視式電磁オッシュログラフで切削抵抗の変化を記録した。

工具は図1(a)に示したジャンクに超硬チップ SI をロウ付けして、すくい角  $0^\circ$ 、逃げ角  $30^\circ$ 、刃先半径  $R$  は表1に示される値になるようにアール研削装置で研削したものをを用いた。

表1 実験条件

要 因 条 件	工具刃先半径の影響		被削材の硬さの影響	剛 性 の 影 響
切 削 速 度 (mm/min)	25			
切 込 増 加 率 (加工面傾斜)	7/400			
工 具 刃 先 半 径 (mm)	0.022 0.055 0.085	0.11 0.22	0.11	0.11
被 削 材 と 硬 さ $H_V$ (kg/mm <sup>2</sup> )	S 50 C		アームコ鉄 85 S 20 C 150 S 50 C 205 S 55 C 233 270	S 50 C
動 力 計 $\times 10^3$ (kg/mm)	A 0.64		A 0.64	A 0.64 B 1.52 C 6.0

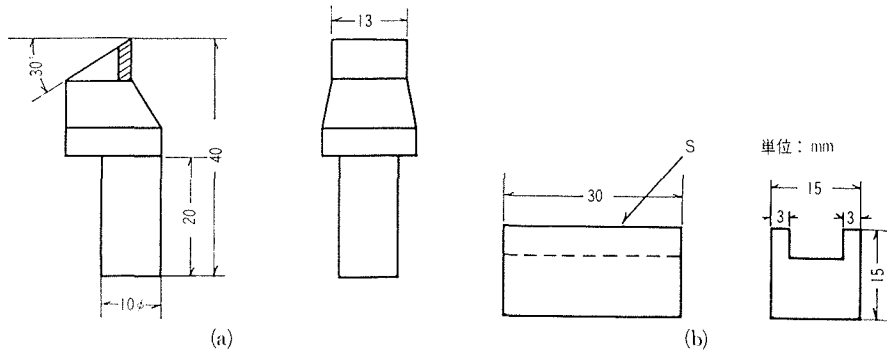


図1 工具および被削材の形状

被削材は表1に示した材料を用い、夫々焼準した後、図1(b)の形に加工し、実験は左右の面については片側づつ行ない、工具の中央部に切削面Sが当たるよう調整した。切削する表面Sは#3,000のアランダム砥粒でラップ仕上げを行ない、表面アラサは $H_{max} \leq 0.3 \mu$ になるよう統一した。

切込量は零から次第に増加するように載物台に適当な傾斜をつけてテーブルに取り付けた。切削面のプロフィール測定には、小坂式SE-3型万能表面形状測定機を用い、切削面の観察は低倍率では光学顕微鏡を用い、高倍率では日本電子製スーパー・スコープを使用した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3-1. 過渡現象

(1) プロフィールと切削抵抗の変化 切削初期に生じる過渡現象は被削材のプロフィールや切

削抵抗 2 分力などから実験的に容易に区別される。過渡現象の観察が容易であるように、切込量が零から次第に増加する方式の乾式低速 2 次元切削を行なうと、図 2 のような被削材のプロファイルが得られる。工具が a 点で被削材と接触した後 ac 間のラビング領域では、刃先がほとんど被削材に喰いこまないでただ表面を擦過しただけの痕跡があり、c 点付近からほりおこし領域に入り次第に刃先が内部に喰いこみ、d 点付近を越えてはじめて刃先が切削方向にほぼ平行に喰いこみはじめている。

これらの過度現象は切削抵抗にも現われている。図 3 は切削抵抗 2 分力と切削距離との関係を示しているが、図 2 のプロファイルから求めた各現象の範囲と対応させると次のとおりになる。すなわちラビング領域の ac 間では切削抵抗 2 分力は共に切削距離の増加につれてほぼ直線的に増加しているが (ab, bc 間ではその勾配を異にしている)、刃先が喰い

こみはじめる c 点付近から接線力が次第に直線からはずれ下に凸の曲線で急増するようになる。d 点付近から切込量が直線的に増加するため接線力はふたたび切削距離の増加につれて直線的に増大し、その増加率は ac 間より大きく、一方法線力はほぼ一定の値を示すようになる。次に接線力  $f_t$  と法線力  $f_n$  との比と切削距離との関係を求めたのが図 4 であって、ab, bc 間では 2 分力比はほぼ一定の値を示し Amonton の法則が成立していることが明らかである。

(2) 表面観察 切削過渡領域における工具と被削材表面との接触状態を調べるため高倍率で表面アラサを測定した。図 5 は縦 10,000 倍、横 100 倍で測定したプロファイルで、ac 間のラ

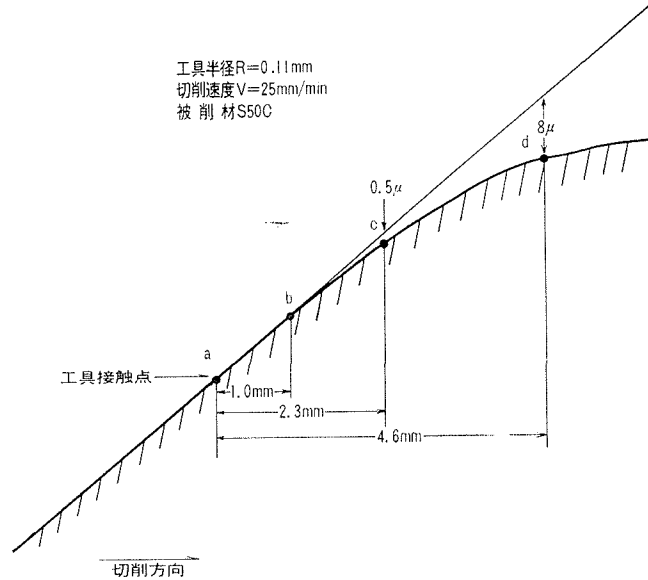


図 2 被削材のプロファイル

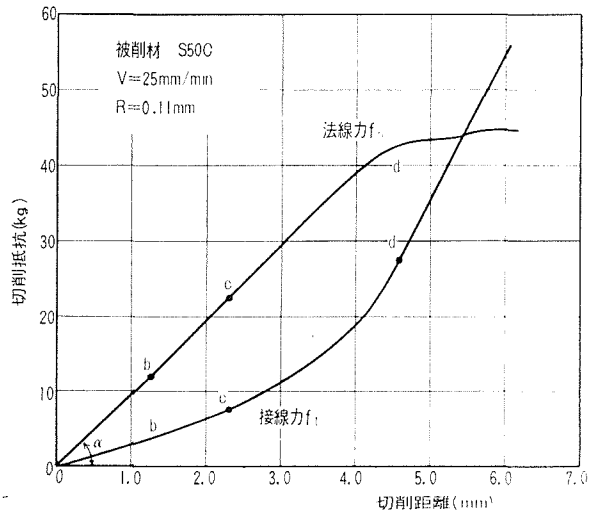


図 3 切削抵抗と切削距離の関係

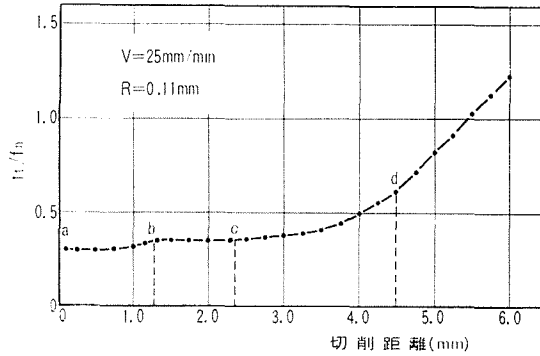


図4  $f_i/f_n$  と切削距離の関係

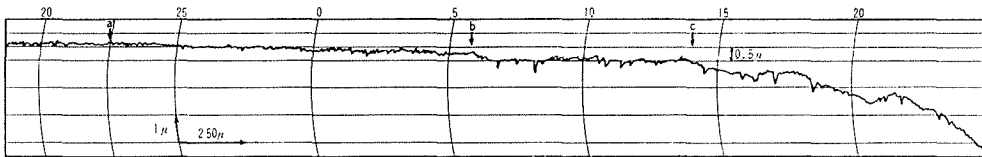


図5 ラビング領域のプロファイル

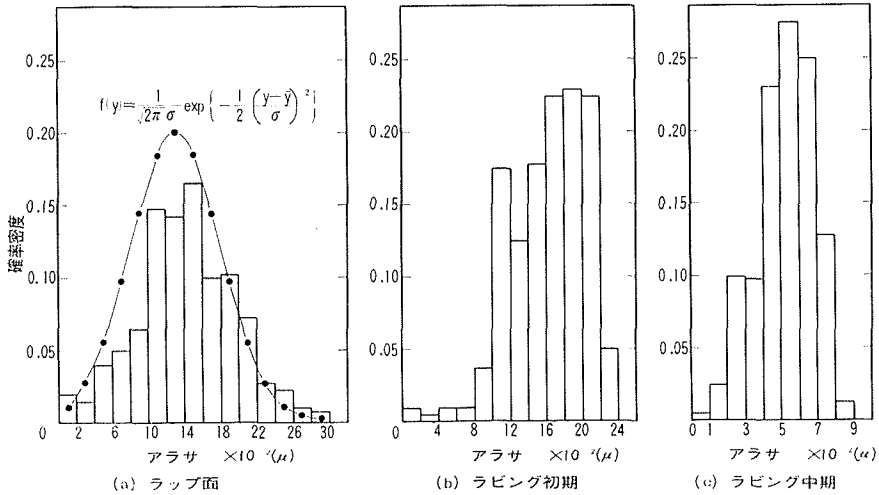


図6 アラサの確率密度ヒストグラム

ビング領域はさらに2つの領域に分けられる。図5で示されるように ab 間のラビング前期では前加工のアラサ曲線はあまり変化していないが、bc 間の後期では約  $0.5\mu$  押しこまれたようにプロファイルは変化しており前加工のアラサ曲線とかなり異なっている。このラビング領域内のアラサ曲線の変化を調べると図6のようになる。図6はアラサの断面曲線からアボットの負荷曲線(分布関数)を求め、その数値微分から決定された密度関数のヒストグラムである。図6(a)は前加工のラップ面のヒストグラムで実線で画かれている計算値の曲線とかなりよく一致しており、ほぼ正規分布しているが、図6(b),(c)に示されているように、ラビングが進むに



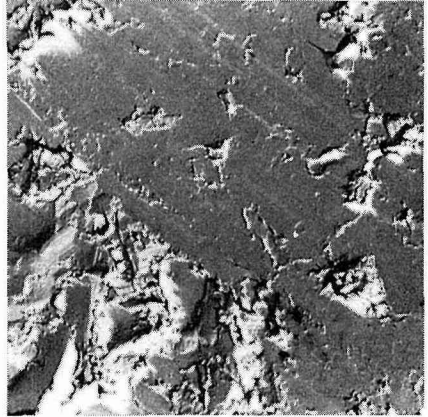
(a) ラップ面



(b) ラッピング前期



(c) ラッピング後期



(d) ほりおこし領域



(e) 切削領域

5 $\mu$ m

図7 被削材表面の電子顕微写真

つれてアラサの山の方に片寄った分布になる。これは工具刃先の接触によりアラサの山の頂が平坦化されるためと考えられる。

この工具の接触による被削材表面状態を電子顕微鏡で詳細に観察したのが図7である。図7 (a) は前加工のラップ面の写真で、図7 (b) はラビング領域前期の写真であり前加工面のアラサの凸凹は部分的に平坦化されているが、図7 (c) の示す後期の表面ではアラサの凸部が削られ押しならされて谷に一部埋めこまれているのが明らかに観察される。図7 (d) は c 点以降のほりおこし領域でほとんどのアラサの凸凹がつぶされたり埋めこまれたりして平滑化され、図7 (e) の切削領域では表面が完全に流動している。この表面観察と前節の切削抵抗やプロファイルの観察から工具刃先と被削材の接触状態について定性的に次のように考えられる。接触の初期では、工具刃先と被削材の表面アラサの凸部が接触し、ともに弾性変形するが刃先と直接接触しているアラサ凸部の先端は降伏して刃先に凝着し、工具の進行と同時に剪断され摩擦力となる。工具の進行（法線力の増加）に伴ない表面写真やアラサ分布曲線から明らかなように真実接触面積が増加し、接線力が法線力に比例して増加する。一方内部素地は弾性変形しており結晶組織は流動していない<sup>(4)</sup>（ラビング前期）。法線力が臨界値を越すと最大剪断応力の作用する表層近くの内部で降伏し表面層（前加工による加工変質層）が押しこまれるが、ラビングが進むにつれて加工硬化が伴い降伏が急速に広がらず工具は上すべりを続ける。接線力は前方への押しこみ力加わるため ab 間より増加率が高く、 $f_t/f_n$  の比も大となる（ラビング後期）。次に法線力が第2の臨界値を越すと降伏が急速に進みほりおこしに入り、接触率がほとんど100%近くになり表面から破壊が進行し切削に入ると考えられる。

### 3-2. 遷移条件

(1) 工具刃先半径並びに被削材硬度の影響 切削工具の成形研磨の作業で、工具刃先をいかに厳密に仕上げても幾何学的に鋭い刃先が形成出来ず、ある有限な丸味を持った刃先しか得られない。したがって切削初期の上すべり現象はこの工具刃先の丸味により大きな影響を受ける。図8は法線力と切削距離の関係を示しているが、ラビング領域内では工具刃先半径によらず一定の勾配で直線的に変化しており、ラビング臨界法線力は刃先半径が大きくなるにしたがい増大しており工具刃先半径の影響を示している。

ラビング領域では、被削材表面が工具刃先と接触するとマイクロ高圧塑性現象でアラサの凹凸が塑性流動して工具と凝着し、摩擦力が生じると考えられる。したがって切削初期において刃先に丸味を持つ工具と被削材の接触状態は、巨視的に見て円柱と平面が接線力の作用する場にお

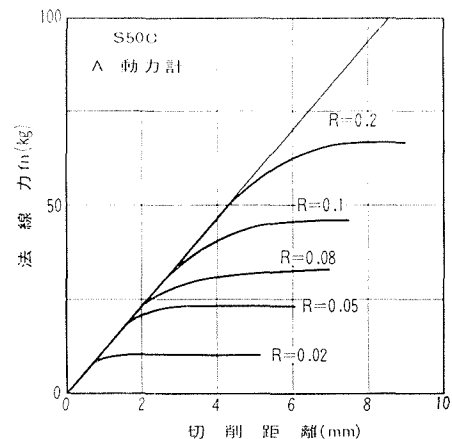


図8 法線力と切削距離の関係

ける弾性接触問題に近似することが出来る<sup>4)</sup>。Poritosky ら<sup>5)</sup>の解析を工具と被削材表面の接触に応用すると、法線力  $f_n$ 、工具刃先半径  $R$  並びに被削材の最大剪断応力  $\tau_{\max}$  の間の関係は

$$\tau_{\max} = 11.23 \sqrt{\frac{f_n}{R}} \quad (1)$$

工具と弾性接触している被削材の内部に生じる剪断応力が、ある限界応力に達した場合に被削材が降伏し、ラビングからほりおこし現象への遷移が起こると考えると、両現象間の臨界法線力  $\bar{f}_n$  と工具刃先半径  $R$  は (1) 式から直線関係にあるはずである。そこで種々の刃先半径を持つ工具で二次元切削を行ない、臨界法線力  $f_n$  をプロフィールと  $f_t/f_n$  の両方の測定から決定し、数回の実験の平均値  $\bar{f}_n$  と  $R$  との関係から求めたところ図9のようになり明らかに直線関係にある。次に図9から直線の勾配を求めラビング前期と後期の最大剪断応力を求めると夫々約  $100 \text{ kg/mm}^2$  と  $160 \text{ kg/mm}^2$  の値が得られたが、これらは通常の方法から得られる値より大きく、加工硬化と寸法効果の影響によるものと考えられる。

次に (1) 式からもわかるように被削材の硬度により臨界法線力は影響される。数種の硬度の異なる被削材で実験を行なうと図10に示される結果が得られ、ラビング臨界法線力  $\bar{f}_n$  は被削材の  $H_v$  に比例する。

(2) 剛性の影響 工作機械を構成している諸要素は剛体でなく、有限なばね定数をもつ弾性体であると考えられる。前述のようにラビング現象

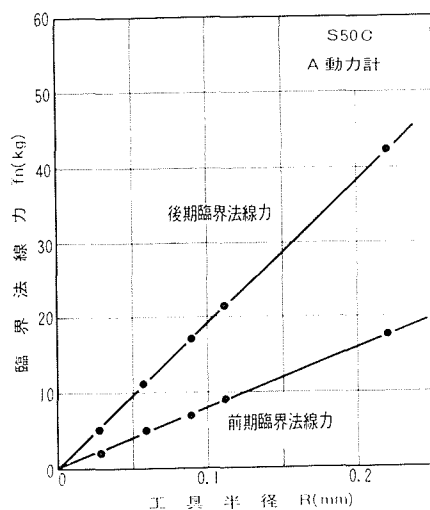


図9 臨界法線力と工具半径の関係

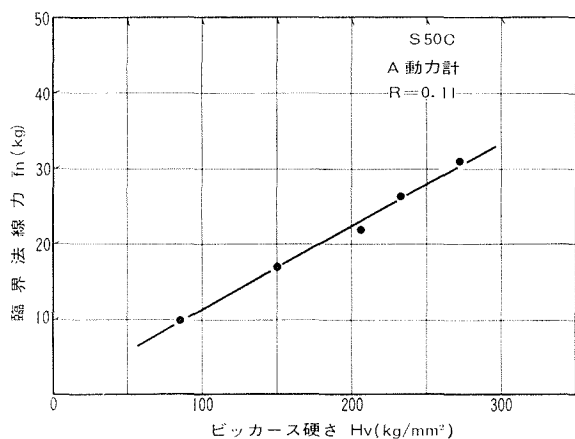


図10 臨界法線力と被削材硬度の関係

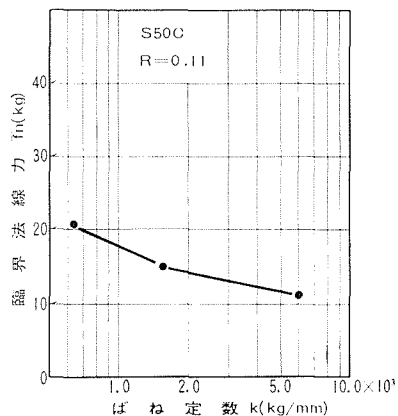


図11 臨界法線力とばね定数の関係

は弾性現象であるため、これら諸要素の示す弾性挙動はラビング現象に大なる影響を与える。図 11 は法線力とばね定数の関係を示している。ラビング臨界法線力は、ばね定数が増すにしたがい減少しており剛性の影響を明らかに示している。

剛性の影響は次のように考えられる。実験に使用した工作機械は図 12 のようなばね系であると考えられる。今被削材の切込み増加率 (勾配)  $\gamma$ 、ラビング長さ  $X_r$ 、法線力  $f_n$ 、動力計のばね定数  $k_a$ 、被削材とテーブルの合成ばね定数  $k_t$  とするとラビング領域内の切残り量  $h$  は、次式で現わされる。

$$h = \gamma X_r = f_n \left( \frac{1}{k_a} + \frac{1}{k_t} \right) = f_n \left( \frac{k_t + k_a}{k_a \cdot k_t} \right) \quad (2)$$

$k_t \gg k_a$  であるから

$$\gamma \cdot X_r = \frac{f_n}{k_a} \quad (3)$$

$V$ : 切削速度,  $t$ : ラビング時間とすると (3) 式は

$$f_n = k_a \cdot \gamma \cdot V \cdot t \quad (4)$$

(4) 式の両辺を微分すると ( $V$  は一定とする),

$$\dot{f}_n = k_a \cdot \gamma \cdot V \quad (5)$$

すなわち (5) 式は、ばね定数の要因は荷重速度と同じ効果を持つものであり、また切込み増加率と切削速度も同等な効果を与えることを示すと考えられる。しかし切削速度はあまり高速になると摩擦熱の発生による影響があるため (5) 式を満たす速度に上限が存在する。

一般に荷重速度が上昇すると材料の降伏応力が增大するが実験事実とは正反対の結果を示している。これに対して次の事が考えられる。工具と被削材表面の接触は荷重速度が大であれば、その真実接触面積は増大し材料の破壊に因与する範囲が拡がるため、寸法効果による強度増加の影響が小さくなり、臨界法線力が減少すると考えられる。

#### 4. 結 言

以上切込み漸増方式による低速 2 次元切削を行ない、切削初期の過渡現象を観察し、それらの遷移条件を実験的に求めた結果次の事柄がわかった。

1. ラビング領域は前期と後期に分けられ前期では工具と被削材の接触は被削材のアラサの凸部に限られるが、後期は次第に接触が増加し上すべりの影響が被削材内部まで達する
2. 表面観察によると工具と被削材の接触はラビングが進むに従い漸次増大し、ほりおこし領域では接触率がほとんど 100% 近くになり、表面から破壊が進行し切削に入ると考えられ

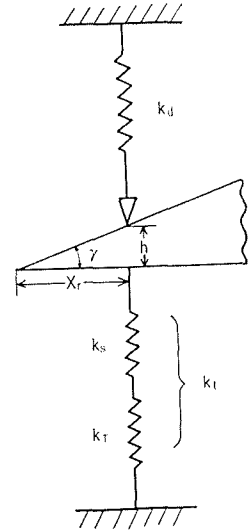


図 12 工作機械のばね系

る。

3. ラビングからほりおこし現象への遷移には臨界法線力が存在する。
4. 工具刃先半径と臨界法線力は直線関係にある。
5. 臨界法線力は被削材の硬さの影響を受ける。
6. 工作機械の剛性による影響は本質的に荷重速度と同等であると考えられる。

終わりに本研究を行なうに際し御教示下さった元北大工業教員養成所教授（現室蘭工業大学教授）星野悟博士に厚く御礼申し上げます。また実験の遂行に常に協力された沢田亀久雄技官、ならびに実験の一部に御援助された本学卒業生、小川七郎、菊地尚、塩見洋二、相馬勲、黄金政年、平出俊彦、小林勝寿、島崎実積の諸氏に深く感謝致します。

#### 参 考 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，投稿中。
3. 正野崎友信：機械と工具，9 (1964)，12，p. 13.
4. 勇田敏夫：精密機械，投稿中。
5. 岡村健二郎・中島利勝：精密機械，32 (1966)，8，p. 551.
6. 山本明・中村示：精密機械，34 (1968)，5，p. 310.
7. 奥島啓式・人見勝人：機械学論文集，26，(昭35)，169，p. 1216.
8. H. Poritosky：Trans of the A.S.M.E. 72 (1950)，p. 191.