



Title	弾性砥石による表面仕上げに関する研究（第1報）：弾性支持工具による軟質金属の引っかき痕
Author(s)	斎藤, 勝政; Saito, Katsumasa; 五十嵐, 悟 他
Citation	北海道大學工學部研究報告, 41, 37-83
Issue Date	1966-08-20
Doc URL	<a href="https://hdl.handle.net/2115/40804">https://hdl.handle.net/2115/40804</a>
Type	departmental bulletin paper
File Information	41_37-84.pdf



# 弾性砥石による表面仕上げに関する研究 (第1報)

—弾性支持工具による軟質金属の引っかき痕—

齋藤勝政\*

五十嵐悟\*

(昭和41年5月7日受理)

## Study on Surface-finishing with an Elastic Wheel

### I. Scratches on Soft Metals with an Elastic Supported Tool

Katsumasa SAITO

Satoru IGARASHI

#### Abstract

In order to determine the mechanism of surface-finishing of soft metals with an elastic wheel, it is necessary to clarify the cutting mechanism of one single grain adhered to the surface of the wheel with some elastic material. For this purpose, scratch tests for Al-alloy plates and a Copper plated aluminum plate were conducted with an elastic supported diamond cone tool, which was considered as a model of a single grain on the surface of the elastic wheel.

In this report, the scratches on a finished soft metal surface were observed under microscope and the scratch dimensions were precisely measured by means of a light-cut method. The dynamic characteristics of the elastic materials used and the micro-Vickers hardness of the soft metals were measured. And the structure of the soft metals was examined under microscope.

The results obtained were follows:

- 1) The motion of the tool during scratching was explained from the character of force applied to the tool and the dynamic characteristics of the elastic materials used.
- 2) With the decrease of spring constant the shape of the longitudinal section of the scratch changed gradually from a circle arc to a shape resembling a ship bottom, and the sliding track extended at both ends of the scratch in the direction of the motion.
- 3) The shape of the pile-ups at the edges of the scratch changed according to the mechanical properties and structures of the specimens.

#### 目 次

1. 緒 言 .....	38
2. 理論的考察 .....	39

---

\* 精密機器学第一講座

3. 実験方法と装置 .....	47
4. 実験条件 .....	50
5. 結果と考察 .....	61
6. 結 語 .....	82

## 1. 緒 言

金属材料の鏡面仕上げ加工には従来からの切削あるいは研削による精密加工法が多く用いられているが、最近弾性砥石と称される砥粒を弾性的に保持した砥石を用い、研削抵抗によって切刃が弾性的に変位することを巧みに利用した鏡面仕上げ加工が行なわれてきている。例えば力学的に粘弾性体として挙動する PVA 樹脂を結合剤とした PVA 砥石<sup>1),2)</sup> がその例であり、高分子化学の発達と研削理論および砥石の成形に関する研究の所産とみることができ。これらの弾性砥石は加工量、加工精度よりむしろ平滑な仕上面を得るのが目的で使用され、特に金属材料のうちでも鏡面を得るのが難しいとされている軟質金属 (Al 合金, Cu 合金), 不銹鋼の表面仕上げに良い結果の得られることが報告<sup>3)</sup> されている。

軟質金属の表面仕上げ加工には電気化学的な方法が広く利用されており、またその基礎研究<sup>4)~7)</sup> も進んでいるが、これに反して機械的な表面仕上げ法の研究はあまり進んでいないようである。その主な原因は材料が軟らかく延性に富むという点にあり、例えば研削加工では砥石の目づまり、ラッピング仕上げでは砥粒の埋め込みなどが起りやすく、鏡面を得ることが難しくなるからである。しかし加工量、寸法精度あるいは形状、表面あらさ、さらには生産コストなどの点から、研削砥石などによる機械加工法が望まれる場合も少なくない。

そのために、上述の弾性砥石 (PVA 砥石など) はいくつかの欠陥を解決して、軟質金属の表面仕上げにかなりの成果を取ってはいる。しかし弾性砥石による加工機構についての研究があまりなされていないために、軟質金属材料にたいする最適研削条件や最適研削砥石の科学的な選定が行なえず、trial and error によって決めていくにすぎない。

そこで弾性砥石による表面仕上げの加工機構を明らかにするために、まず軟質金属材料を選び、その基礎研究として次に示すような弾性支持工具による軟質金属材料の引っかかり実験を行なった。

まず、弾性砥石の加工機構を知るためには、加工を行なっている弾性砥石の表面の一個の砥粒に着目し、その挙動を観察する必要があると考えられる。しかし砥粒の大きさはせいぜい  $5\mu$  程度であり、これが弾性的にプラスチック結合剤に保持されて運動している状態を観察し追跡することはなかなか難しい作業である。したがって弾性的に支持されたダイヤモンド円錐工具からなる砥粒模型を考え、これで実際の加工速度に近い速度でアルミニウム合金および銅の表面を適当な切り込みを与えて引っかかり、そのときの工具の挙動やそれによって生じた引っかかり痕の形状などを観察し、その結果から弾性砥石における一個の砥粒の加工機構を解析する方法を用いた。

この種の研究は単粒研削あるいは引っかき実験として数多く行なわれ、その成果は一応整理されて報告されている<sup>8-11)</sup>。しかしいずれの場合にも砥粒(あるいはその模型工具)は剛性支持を仮定した場合に限られており、実際に起っているとみられる弾性変形、あるいは弾性支持された場合についての考察はなされていない。またその実験における切り込み精度もあまり高いものは見あたらないようである。砥粒を弾性体で支持した場合には、切り込み精度が直接実験データの信頼性を左右することになるから、特に切り込み精度の高い引っかき実験装置を試作する必要がある。

そこで本報告では、試作した引っかき実験装置の性能と弾性支持された工具の挙動を解析し、引っかき痕の観察と引っかき痕形状の立体的測定とから引っかき現象の解析を行なった。基本的にいかなる現象が起るかを詳細に調べることが重要であると考えられるので、①工具を支持する弾性体の静的および動的特性を測定し、②これからある仮定と近似を置いて振子の回転運動による弾性体の伸びと引っかき中の工具の挙動を調べ、③引っかき痕については、光切断法によってその形状を立体的かつ詳細に観測し、④これらを材料の機械的性質および組織との関係から検討した。

その結果、①ダイヤモンド円錐工具による引っかきでは、工具を弾性支持することによって材料の変形機構そのものが大きく変ることではない。しかし、②引っかき痕形状は弾性体の特性によって変化し、③特に引っかき痕の喰い込み部と離脱部で観察される、いわゆる摩擦痕の長さは弾性体の特性によって支配されること、また、④引っかき痕の縁にはかなり大きなもり上りが観察され、⑤このもり上り形状は弾性体の特性とはほとんど関係がなく、材料の機械的性質と組織とに関係すること、さらに、⑥これら引っかき痕形状の特徴は、弾性体の特性と材料の機械的性質および組織から定性的に説明できること、などが明らかとなった。

## 2. 理論的考察

弾性砥石による加工模型として、まず砥石表面における砥粒切れ刃の形状を円錐と考え、これが弾性支持された状態で平面である試料表面を引っかき、切りくず、もり上りを生成する機構を考えた。一般に研削砥石における1個の砥粒切れ刃のエンゲージの状態を考えると、切り込みが0からゆるやかに増加し、最大切り込み深さを経てしだいに減少し、最後には0となって離れてゆく場合が多い。したがって弾性砥石表面の1個の砥粒の研削作用は、振子の先端に弾性体を介して取付けた円錐工具と試料表面との引っかき実験によって模型化することができる。

この場合、振子の回転運動による工具先端の運動、その工具先端の描く二重円錐面の平面による切断面、滑らかに増加し、減少して働く引っかき抵抗による工具の運動などを知ることによって、弾性支持された円錐工具による引っかき痕の形状を解析することができる。

### 2-1 工具支持弾性体の静的および動的伸び

工具が弾性体で支持されている場合、切り込みの0点を定める際に工具と支持円板の荷重による弾性体の静的な伸び ( $\delta_{r_0}$ ) が問題になる。さらに振子がある振上角 ( $\alpha_0$ ) から振り下ろす場合には、振子の回転運動による遠心力のために、振子の軸方向に  $\alpha_0$  に応じた動的な伸び ( $\delta_r$ ) が加えられる。したがって工具を弾性支持した場合の切り込みには、与えた切り込み ( $d_0$ ) のほかに工具が試料に喰い込む直前の弾性体の動的伸びおよび静的伸びを考慮して、 $d_0 + (\delta_r - \delta_{r_0})$  を考えるのが妥当である。そこで次に弾性体の特性から計算した静的伸び ( $\delta_{r_0}$ ) と動的な伸び ( $\delta_r$ ) を吟味した。

### 2-1-1 静的な伸び

振子がある振上角 ( $\alpha_0$ ) で静止している場合の工具支持弾性体の振子の軸方向の伸び ( $\delta_{r_0}$ ) は、これと直角方向の伸びによる影響を微小なものとして無視すれば、 $\delta_{r_0}' = mg \cos \alpha_0 / k_0$  から計算される。ここで、 $m$ : 工具と支持円板の質量、 $g$ : 重力による加速度、 $k_0$ : 弾性体の静的なバネ定数である。振子が鉛直位置にあるとき、すなわち切り込み設定時の切り込み方向の伸び ( $\delta_{r_0}$ ) は  $\alpha_0 = 0$  の場合で、 $\alpha_0 = \pi/6$ 、 $\alpha_0 = \pi/2$  の場合の伸びとともに表 2-1-1 に示した。

表 2-1-1 弾性体の静的な伸び

支持弾性体	厚さ mm	バネ定数 $k_0$ kg/mm	$\delta_{r_0}' \mu$		
			$\alpha_0 = 0$	$\alpha_0 = \pi/6$	$\alpha_0 = \pi/2$
A	2.3	99	0.072	0.061	0
B	2.0	6.0	1.2	1.0	0
C	5.5	2.2	3.2	2.8	0

### 2-1-2 動的な伸び<sup>12),13)</sup>

振子の周期から考えて弾性体の変形を取扱うべきバネ定数はせいぜい  $2c/s$  程度の値でよい。したがって動的とは云ってもバネ定数には静的な値を用いて十分である。いま工具先端と振子の軸となす角は微小であるとしてその影響を無視すると、弾性体の変形について次の運動方程式が得られる。

$$m\ddot{\delta}_r + f\dot{\delta}_r + k_0\delta_r = mg \cos \alpha + mR(\dot{\alpha})^2 \quad (1)$$

ここで、 $m$ : 工具と支持円板の質量、 $f$ : 弾性体の粘性に関する定数、 $k_0$ : 弾性体のバネ定数、 $g$ : 重力による加速度、 $R$ : 振子の回転中心から工具先端までの長さ、 $\delta_r$ : 弾性体の振子の軸方向の変位、 $\alpha$ : 振子の軸が鉛直となす角である。右辺の  $\alpha$  は 4-4、で述べるように

$$I\ddot{\alpha} = -Mgh \sin \alpha \quad (2)$$

の解であり、 $\dot{\alpha}$  と  $\cos \alpha$  の関係は

$$\frac{1}{2} I(\dot{\alpha})^2 = Mgh(\cos \alpha - \cos \alpha_0) \quad (3)$$

で与えられる。(2)式において  $\sin \alpha \doteq \alpha - \alpha^3/6$  とおいたときの第2近似解は、 $p_0 = \sqrt{Mgh/I}$  として次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= A \cos p_1 t + B \cos 3p_1 t \\ A &= \alpha_0 + \frac{p_0^2 \alpha_0^3}{192 p_1^2} \\ B &= -\frac{p_0^2 \alpha_0^3}{192 p_1^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ただし  $p_1$  は次式から求められる。

$$p_1^2 = p_0^2 - \frac{1}{8} p_0^2 \alpha_0^2 \quad (5)$$

これから  $(\dot{\alpha})^2$  は

$$(\dot{\alpha})^2 = C - D \cos h_1 t - E \cos h_2 t - F \cos h_3 t \quad (6)$$

$$C = \frac{p_1^2}{2} (A^2 + 9B^2), \quad D = \frac{p_1^2}{2} (A^2 - 6AB)$$

$$E = 3AB, \quad F = \frac{B^2}{2}$$

$$h_1 = 2p_1, \quad h_2 = 4p_1, \quad h_3 = 6p_1$$

となるから(1)式は次のような標準形に書き直すことができる。

$$\ddot{\delta}_r + 2\varepsilon_0 \dot{\delta}_r + \omega^2 \delta_r = g \cos \alpha_0 + G(C - D \cos h_1 t - E \cos h_2 t - F \cos h_3 t) \quad (7)$$

ただし、 $G = g/2p_0^2 + R$ ,  $2\varepsilon_0 = f/m$ ,  $\omega^2 = k_0/m$

初期条件として、 $t=0$  で  $\delta_r = \delta_{r0}$ ,  $\dot{\delta}_r = 0$  を用いて両辺をラプラス変換して整理すると、

$$\begin{aligned} L\delta_r &= \frac{g \cos \alpha_0 + GC}{s(s+p)(s+q)} - \frac{Gs}{(s+p)(s+q)} \left( \frac{D}{s^2 + h_1^2} + \frac{E}{s^2 + h_2^2} + \frac{F}{s^2 + h_3^2} \right) \\ &+ \frac{(s+2\varepsilon_0)\delta_{r0}}{(s+p)(s+q)} \end{aligned} \quad (8)$$

ただし、 $-\rho, -q$  は  $r^2 + 2\varepsilon_0 r + \omega^2 = 0$  の根で、 $p > q$  とする。(8)式をラプラス逆変換して、

$$\begin{aligned} \delta_r &= (g \cos \alpha_0 + GC) \left\{ \frac{1}{pq} + \frac{qe^{-\rho t} - pe^{-qt}}{pq(p-q)} \right\} + \delta_{r0} \frac{qe^{-\rho t} - he^{-qt}}{q-p} \\ &+ \frac{GD}{J_1} \left\{ \frac{(\beta_1 - p)e^{-\rho t} - (\beta_1 - q)e^{-qt}}{q-p} - \cos h_1 t - \frac{\gamma_1}{h_1} \sin h_1 t \right\} \\ &+ \frac{GE}{J_2} \left\{ \frac{(\beta_2 - p)e^{-\rho t} - (\beta_2 - q)e^{-qt}}{q-p} - \cos h_2 t - \frac{\gamma_2}{h_2} \sin h_2 t \right\} \\ &+ \frac{GF}{J_3} \left\{ \frac{(\beta_3 - p)e^{-\rho t} - (\beta_3 - q)e^{-qt}}{q-p} - \cos h_3 t - \frac{\gamma_3}{h_3} \sin h_3 t \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

を得る。ただし

$$\beta_i = \frac{(p+q)pq}{pq - h_i^2}, \quad \gamma_i = \frac{(p+q)h_i^2}{pq - h_i^2},$$

$$J_i = h_i^2 - \{(p+q)r_i + pq\} \quad (i = 1, 2, 3)$$

ここで、 $\omega^2 \gg p_1^2$ 、すなわち  $pq \gg h_i^2$  の場合には上の各値は、

$$\beta_i \doteq (p+q), \quad r_i \doteq (p+q)h_i^2/pq \quad J_i \doteq -pq \quad (i = 1, 2, 3)$$

となる。これらの値を(9)式に代入すれば解が得られるわけであるが、求める伸びは  $t \doteq T_1/4 = \pi/2p_1$  における値であるから、

$$h_1 t \doteq 2p_1 \cdot \frac{\pi}{2p_1} = \pi, \quad h_2 t \doteq 4p_1 \cdot \frac{\pi}{2p_1} = 2\pi, \quad h_3 t \doteq 6p_1 \cdot \frac{\pi}{2p_1} = 3\pi$$

したがって、

$$\cos h_1 t \doteq -1, \quad \cos h_2 t \doteq 1, \quad \cos h_3 t \doteq -1$$

$$\sin h_1 t = \sin h_2 t = \sin h_3 t \doteq 0$$

となる。さらに、 $\varepsilon_0^2/\omega^2 \doteq 1$  の場合には  $p \doteq q \doteq \omega$  となり、 $pt \doteq qt \doteq \omega t$  において  $t \doteq \pi/2p_1$  とおけば、 $\omega t \doteq \frac{\pi\omega}{2p_1} \gg 1$  であるから、 $e^{-\omega t} \doteq e^{-q t} \doteq 0$  となって(9)式から  $t \doteq T_1/4$  における次の簡単な近似式が得られる。

$$(\delta_r)_{t \doteq T_1/4} = \frac{1}{pq} \{g \cos \alpha_0 + G(C+D-E+F)\} \quad (10)$$

したがって先の2つの仮定、すなわち  $\omega^2 \gg p_1^2$ 、 $\varepsilon_0^2/\omega^2 \doteq 1$  が成り立つならば(10)式から弾性体の動的伸びが計算できる。実際に各弾性体についてこの仮定が成り立つことを確かめ、 $\alpha_0 = \pi/6$ 、 $\alpha_0 = \pi/2$  の場合について(10)式から計算で求めた動的な伸び( $\delta_r$ )を、切り込みの増加( $\delta_r - \delta_{r0}$ )とともに表2-1-2に示した。

表 2-1-2 弾性体の動的な伸び

支持弾性体	バネ定数 $k_0$ kg/mm	$\alpha_0 = \frac{\pi}{6}$		$\alpha_0 = \frac{\pi}{2}$	
		$\delta_r$ $\mu$	$\delta_r - \delta_{r0}$ $\mu$	$\delta_r$ $\mu$	$\delta_r - \delta_{r0}$ $\mu$
A	99	0.13	0.060	0.27	0.20
B	6.0	2.2	0.97	4.5	3.3
C	2.2	7.7	4.5	14	11

## 2-2 剛性支持の場合の引っかき痕の長さ

剛性支持で、引っかきの際工具の変形がなく工具の通過した軌跡がそのまま引っかき痕となるものと仮定すると、振子の長さ( $R$ )と与えた切り込み( $d_0$ )によって引っかき痕の長さ( $l_{th}$ )を幾何学的に計算することができる。工具の先端は振子の回転軸を中心とする円弧を描き、したがって引っかき痕は弧の高さが $d_0$ の弓形となる(図2-2-1)。これから弦の長さ、つまり引っかき痕の長さは次式で与えられる。

$$l_{th} = 2\sqrt{R^2 - (R - d_0)^2}$$

ここで、 $R \gg d_0$  であるから、

$$l_{th} \approx 2\sqrt{2Rd_0} \quad (1)$$

によって引っかき痕の長さが求められる。 $R = 480 \text{ mm}$  を代入して、切り込み  $2, 5, 8, 12 \mu$  の場合の引っかき痕の長さを計算したのが表 2-2-1 である。

表 2-2-1 理論的引っかき痕長さ

切り込み $d_0 \mu$	理論的引っかき痕長さ $l_{th} \text{ mm}$
2	2.78
5	4.39
8	5.54
12	6.79

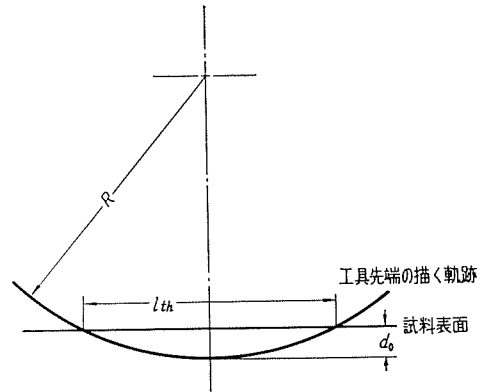


図 2-2-1 切り込みと引っかき痕長さの関係

## 2-3 引っかき痕の横断面および縦断面形状

### 2-3-1 横断面形状

引っかき痕の引っかき方向に垂直な断面を横断面とする。引っかき痕がもり上りをともなわず、工具の進行によって引っかき痕内の材料はすべて切りくずとなって排出される理想の場合には、引っかき痕の横断面形状は工具の引っかき方向への投影として与えられる。しかし、一般には引っかきによってできる引っかき痕は、その両側にもり上りをともなっている。したがって横断面形状は図 2-3-1 に示したようなものとなる。この図から次の諸量を定義する。

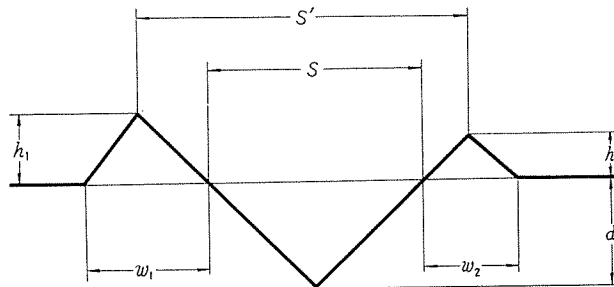


図 2-3-1 引っかき痕の横断面形状

引っかき痕の深さ:  $d$

引っかき痕の幅:  $s, s'$

もり上り高さ:  $h_1, h_2$

もり上り幅:  $w_1, w_2$

もり上り比 :  $(m_1+m_2)/M$

$$\text{ただし, } M = \frac{sd}{2}, \quad m_1 = \frac{w_1 h_1}{2}, \quad m_2 = \frac{w_2 h_2}{2}$$

もり上り係数 :  $\alpha = \frac{h_1+h_2}{2d}, \quad \beta = \frac{w_1+w_2}{2s}$

なおここで定義した引っかけ痕の幅 ( $s$ ) は工具の先端形状 (図 4-2-1 参照) から幾何学的に次のように求められる。

$$d \leq \rho_r \text{ の場合: } s = 2\sqrt{d(2r-d)} = 2\sqrt{d(9.0-d)} \quad (2)$$

$$d < \rho_r \text{ の場合: } s = 2(d+\rho_r) \tan \theta = 2\sqrt{3}(d+0.7) \quad (3)$$

また  $s'$  はもり上り係数 ( $\beta$ ) を用いて、次式で表わされる。

$$s' = (1+\beta)s \quad (4)$$

あるいは、 $\alpha$  を用いて

$$(1+\alpha)d \leq \rho_r \text{ の場合: } s' = 2\sqrt{(1+\alpha)d\{9.0-(1+\alpha)d\}} \quad (5)$$

$$(1+\alpha)d > \rho_r \text{ の場合: } s' = 2\sqrt{3}\{(1+\alpha)d+0.7\} \quad (6)$$

と表わすことができる。

### 2-3-2 縦断面形状

縦断面形状は引っかけ痕の引っかけ方向の断面形状である。剛性支持による引っかけの縦断面形状は 2-2 で述べたように円弧になるが、弾性支持による引っかけでは工具支持弾性体に働く遠心力、引っかけ抵抗などに応じた特殊な形状を示すことになる。また引っかけ痕の両側に存在するもり上りを考えると、縦断面形状はさらに複雑になる。

いま最も簡単な場合として静止している弾性支持工具に引っかけ抵抗として正弦状に変化する力  $F_0 \sin \omega t$  が半サイクル作用する場合を考え、これにより生じた工具先端の運動を次のようにして求めてみた<sup>13)</sup>。まず運動方程式は、工具と支持円板の質量を  $m$ 、弾性体の粘性に関係する定数を  $c$ 、バネ定数を  $k$ 、工具先端の変位を  $x$  として次のように与えられる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t \quad (1)$$

ここで、 $p^2 = k/m$ 、 $2n = c/m$  とおいて (1) 式を標準形に直すと次式が得られる。

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + p^2 x = \frac{F_0}{m} \sin \omega t \quad (2)$$

(2) 式は減衰に関係する量  $n^2$  と量  $p^2$  の大小によって次の 2 通りの解がある。

i)  $p^2 > n^2$  の場合

$$x = e^{-nt}(C_1 \cos p_1 t + C_2 \sin p_1 t) + A \sin(\omega t - \alpha) \quad (3)$$

ただし、 $p_1^2 = p^2 - n^2$  で、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $A$ 、 $\alpha$  は初期条件によって決まる定数であり、ここでは  $t=0$

で  $x = \dot{x} = 0$  であるから,

$$C_1 = A \sin \alpha, \quad C_2 = (nA \sin \alpha - \omega A \cos \alpha) / p_1 \quad (4)$$

$$A = \frac{F_0}{k} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + \frac{4n^2\omega^2}{p^4}}} \quad (5)$$

$$\tan \alpha = \frac{2n\omega}{p^2 - \omega^2} \quad (6)$$

となる。さらに、減衰が小さく共振点から遠く離れている場合には、位相角 ( $\alpha$ ) が小さいので (4) 式は,

$$C_1 = 0, \quad C_2 = -\frac{\omega A}{p_1} \quad (4')$$

となり、(4) 式の近似式が次のように得られる。

$$x = -\frac{\omega A e^{-nt}}{p_1} \sin p_1 t + A \sin \omega t \quad (7)$$

ii)  $p^2 < n^2$  の場合

$$x = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + A \sin(\omega t - \alpha) \quad (8)$$

ただし、 $r_1, r_2$  は  $r^2 + 2nr + p^2 = 0$  の根である。 $C_1, C_2$  は i) と同じ初期条件から

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= -\frac{r_2 A \sin \alpha + \omega A \cos \alpha}{r_1 - r_2} \\ C_2 &= \frac{r_1 A \sin \alpha + \omega A \cos \alpha}{r_1 - r_2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

となり、 $A, \alpha$  は各々 (5), (6) 式で与えられる。

ここで実験に用いた  $C$  弾性体による支持条件で、切り込み  $12 \mu$ , 引っかかり速度  $3.6 \text{ m/sec}$  の場合について工具先端の運動を計算してみた。

まず、与える切り込みは  $12 \mu$  であるが振子の回転運動による弾性体の伸び  $11 \mu$  が加えられるから、引っかかり時における切り込みは  $23 \mu$  である。したがって外力の振動数 ( $\omega$ ) は、切り込みを  $23 \mu$  とした場合の剛性支持による引っかかり痕の長さから引っかかり時間を計算して求めることができる。弾性体の弾性率および粘性率は、この外力の振動数 ( $\omega$ ) における値を用いた。これから  $n^2, p^2$  が計算され、その結果をまとめて表 2-3-1 に示した。表からわかるよう

表 2-3-1 外力の振動数と振動の定数

外力の振動数	バネ定数	粘性係数	$p^2$	$n^2$
$\omega \text{ 1/sec}$	$k \text{ kg/mm}$	$c \text{ kg sec/mm}$	$\times 10^7 \text{ 1/sec}^2$	$\times 10^7 \text{ 1/sec}^2$
1,200	250	0.012	3.5	7.0

にこの場合は  $p^2 < n^2$  で (1) 式の解は (8) 式で与えられる。外力の振幅  $F_0$  を引っかかり抵抗の最大値として 300 g とすれば, (8) 式の各定数が次のように求められた。

$$A = 11\mu, \quad \alpha = 0.53$$

$$C_1 = 6.0\mu, \quad C_2 = -0.68\mu$$

したがって解は,

$$x = 6.0 e^{-3.3t} - 0.68 e^{-13t} + 11 \sin(1.2t - 0.53) \quad (10)$$

となる。ただし  $t$  の単位は m sec である。

(10) 式は工具先端の変位を表わしているから, 引っかかり痕の深さ, つまり縦断面形状が図 2-3-2 のように求められた。すなわち, 工具が左から右に矢印の方向に引っかいた場合, 剛性支持

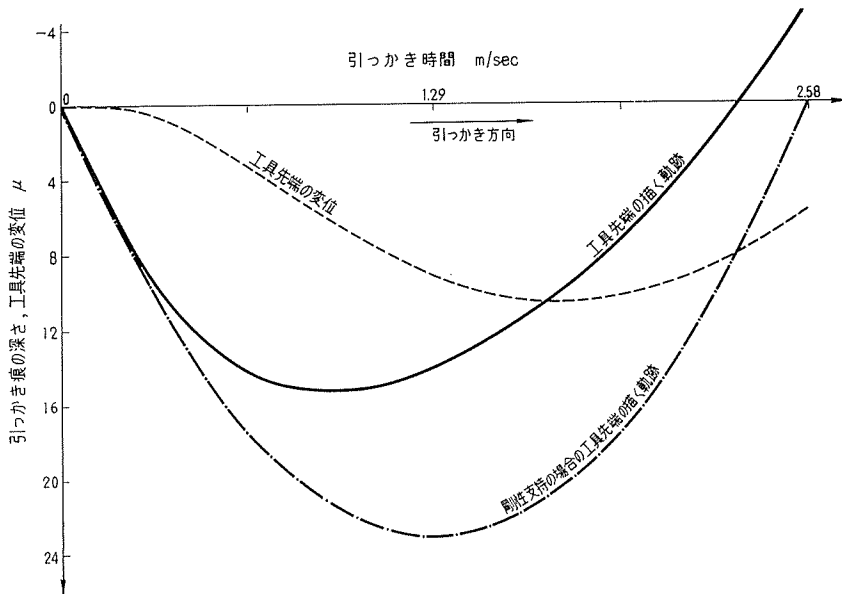


図 2-3-2 C 弾性体支持の場合の引っかかり痕の縦断面形状

されている工具先端の描く軌跡は一点鎖線で描いた円弧として求められる。しかし弾性支持され正弦的に変化すると考えられる外力が工具に加わったとき, 工具先端は図に実線で示したような軌跡をとり, 引っかかりの縦断面形状は, はじめは剛性支持の場合に近いがしだいに深さが減少して平坦となり, ゆるやかな勾配をもって試料表面に近づいて行く形になることがわかった。

しかし引っかかり中に工具を介して弾性体に加わる力は正弦状のものではなく, もっとも複雑な変化をしており, さらに振子の回転運動による工具先端の運動もここでは考慮していないので, 厳密な引っかかり痕形状は求められていない。もし引っかかり抵抗が引っかかり痕の深さと一義的な関係にあるとすれば, 引っかかり抵抗の垂直方向の分力を測定しこれを外力として数値計算あるいは図式解法などによって (1) 式の解が得られ, もっと正確な引っかかり痕形状を求める

ことができると考えられる。

ここでは引っかき痕の縦断面形状が工具の弾性支持条件、すなわち弾性体の特性に対する動的考慮と、外力を適当に近似することによって、定性的には説明がつくことを示すにとどめた。

### 3. 実験方法と装置

#### 3-1 実験方法

弾性砥石の個々の砥粒の加工模型として考えた単粒引っかき実験であるから、2. でも一部触れたように次の条件を満すことが望ましい。

- 1) 砥粒切刃模型としてダイヤモンド円錐工具が適当である。
- 2) 工具は弾性支持されること。
- 3) 切り込みは数  $\mu$  程度の微小切り込みであること。
- 4) 切り込みは1回の引っかきで、0から始まって単調に増加し、最大切り込み深さを経てから減少しはじめ、最後には0になるような変化をすること。
- 5) 引っかき速度は一般の加工速度 (10~200 m/min) に近いこと。

そこで以上の諸条件を満足するものとして、適当な長さの振子の先端に弾性体を介してダイヤモンド円錐工具を取り付け、振子の回転運動を利用して工具先端が水平に置かれた試料表面を引っかく実験方法を採用した。この方法によると、振子の振り上げ角によって適当な引っかき速度が得られ、たま振子の自重によって適当な引っかきエネルギーを得ることができる。

砥粒の切刃模型として小林<sup>9)</sup>、佐藤<sup>14)</sup>らの多くの研究から、切り込みの小さい加工条件では、先端に丸みのある円錐を考えてよいことが知られている。方向性と直線刃を持った角錐工具による引っかき実験も必要であるが、実験を単純化するために切刃模型としてダイヤモンド円錐工具を用いた。

また弾性砥石の表面における切刃の挙動に関する詳しい知識は持っていないが、研削抵抗によってまず切刃は自由度の高い切り込み方向に変位し、つぎに研削方向の変位と切刃の回転が起るものと考えられる。したがって、円錐工具を弾性的に支持するために、引っかき方向の変位や工具の回転に比べて切り込み方向に変位しやすいように、円板状の弾性体を工具を取り付けた円板と振子との間にはさみ込ませた。

引っかき速度は長さ 480 mm の振子の運動によって容易に得られるし、平面と振子先端とのエンゲージによって円弧状の微小切り込みも得ることができる。

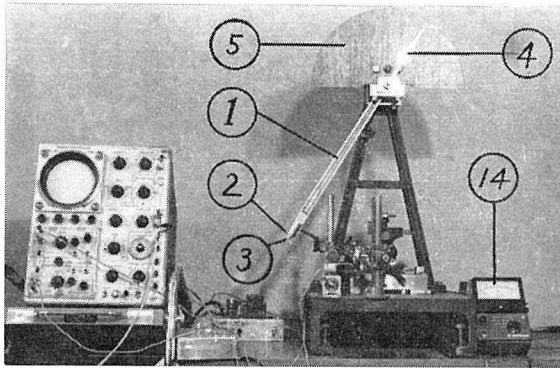
切り込み、すなわち工具と試料との相対距離を適当量だけ与えるためには、振子の上下より試料面の上下の方が装置の構造が簡単であり、切り込み精度も高められる。また円弧状の微小切り込みを与えるためには、試料表面を良い平面とし、かつ振子運動面に直角にしなくてはならない。さらに、切り込みを与える場合、試料表面は最初の面に対して常に平行平面でなく

てはならないし、振子も常に同一面で振動する必要がある。そこで表面を仕上げた試料を支持台上に固定し、これを3本のマイクロメータ・ヘッドによって鋼球を介して支持し、この3本のマイクロメータ・ヘッドを上下することによって試料面の傾きを調整し、切り込みを与えるようにした。

またチタン酸バリウム圧電素子を利用した動力計を試作して、試料に作用する引っかかり抵抗の垂直、水平2分力を独立に測定できるようにした。

### 3-2 実験装置

引っかかり実験装置は工具を支持し運動させる部分と、試料を固定し切り込みを与える部分の2つに分けられる。これら実験装置の概要を図3-2-1に、試料支持台付近の詳細を図3-2-2



- ① 振子
- ② 工具支持弾性体
- ③ ダイヤモンド円錐工具
- ④ 指針
- ⑤ 分度器
- ⑭ 電気マイクロメータ

図 3-2-1 引っかかり実験装置

- ⑥ 試料
- ⑦ 試料支持台
- ⑧ ベネ
- ⑨, ⑩ マイクロメータ・ヘッド
- ⑪, ⑫ 水準器
- ⑬ 電気マイクロメータの測定端子
- ⑮ 読み取り顕微鏡

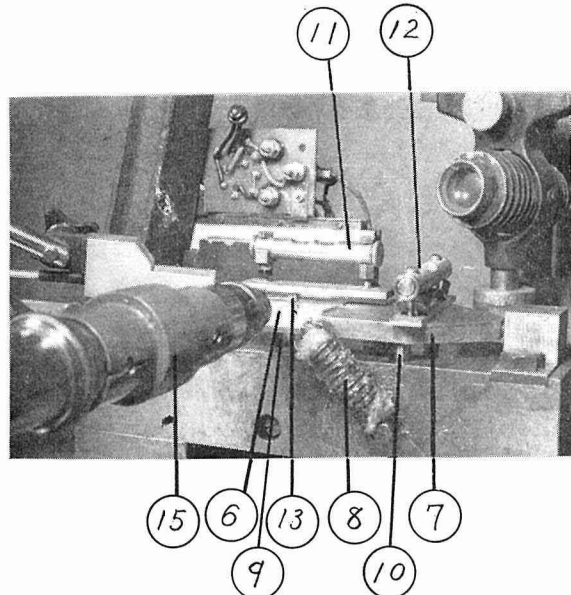


図 3-2-2 引っかかり実験装置 (試料支持台付近の詳細)

に示した。

振子① (Al 合金製, 重量 683 g) は回転による振れがないように, 負のしめしろをもつ単列深溝玉軸受 2 コによって支持されており, その先端に弾性体②を介してダイヤモンド円錐工具③が取り付けられている。振子の振り上げ角は, 振子の回転軸に取り付けた指針④と分度器⑤で読み取る。振子は適当な振り上げ角から初速度 0 で振り落とし, 振子先端に取り付けた工具が試料⑥の表面を引っかくようにした。工具は 4 mm $\phi$  のスチール棒の先端にダイヤモンド円錐を埋め込んだものである。これを振子に取り付けるには, ダイヤモンド円錐の埋め込まれたスチール棒を 25 mm $\phi$ , 厚さ 7 mm の Al 合金製の円板の中心軸でネジ止めし, この円板と振子先端の間に弾性体をはさみ, それぞれボンドで接着した。接着が完全であるように, 実験は接着後少なくとも 24 時間経過してから行なった。剛性支持による引っかきの場合には, 円板を直接振子先端にネジで固定した。いっぽう試料は横方向から 2 本のネジによって Al 合金製の試料支持台⑦上に固定した。この 2 本のネジをゆるめると試料は支持台上を前後にスライドさせることができ, 試料に横送りを与えることができる。試料支持台は 2 本のバネ⑧と 3 本のマイクロメータ・ヘッド⑨, ⑩ $\times$  2 により, 4 mm $\phi$  の鋼球を介して支えられている。この 3 本のマイクロメータ・ヘッドを上下し, 水準器⑪, ⑫によって試料表面の水平を保ちながら任意の切り込みを与えることができる。切り込み量は電気マイクロメータの測定端子⑬で検出しメータ⑭で読み取った。切り込みの 0 点は, 振子を鉛直におろして 3 本のマイクロメータを上下し, 読み取り顕微鏡⑮を覗いて工具先端とその試料面上の鏡像とが接触し, しかも試料面が水平となる位置として決めた。

### 3-3 測定方法

引っかき痕はその長さが 3~7 mm, 最大深さが 2~12  $\mu$  で, もり上りを持つ円弧状になるものと考えられる。これら引っかき痕形状の定量的な測定の外に, 引っかき痕の性状に関する定性的観察も引っかき現象の解析には必要である。

そこで, オリンパス光学社製の金属顕微鏡 MF および TO 式顕微干涉計 MI によって引っかき痕の性状を観察し, また顕微鏡写真による観察も行なった。

引っかき痕の形状については, 従来の測定ではそのほとんどが触針式あらさ検査機によるもので, 特にもり上りの観察<sup>15)~17)</sup>に重点がおかれていた。しかし弾性支持工具による引っかきの場合には引っかき痕の深さの変化が問題であり, もり上りも決して規則的ではないので, ある 1 つの引っかき痕断面を測定しただけでは不十分である。したがって引っかき痕の形状を明確にとらえるには, 従来の研究では行なわれていなかったような立体的な形状測定が必要である。ところが材料が軟質であるために触針法による測定では表面にきずがついて形状をそこない, その正しい形状を測定することができないおそれがある。また光波干涉による方法では, 切り込みやもり上りが光の波長に比べて大きすぎて適さない。そこで, 0.5~50  $\mu$  範囲のあらさを非接触で測定できるカールツァイス・イエナ社製の光切断式仕上面検査機を用いて, 引っ

かき痕の横断面形状を連続して精密に測定した。

引っかき実験によって得られた引っかき痕は約 1,000 本あり、これらすべてを測定することはできないので、おもに切り込み  $12\ \mu$  のものについて、引っかき痕の開始点から引っかき方向へ  $0.2\ \text{mm}$  間隔に、引っかき痕の深さ、幅、もり上り高さを連続して測定し、引っかき痕の立体的形状を観測した。

#### 4. 実験条件

実験条件をまとめたのが表 4-1 である。表中の各項目について吟味したところを次に詳しく説明する。

表 4-1 引っかき実験条件

	条 件
試 料	Al 合金: 24 S, 25 S, 56 S. 電鍍銅
工 具	ダイヤモンド円錐 (頂角 $120^\circ$ , 先端半径 $4.5\ \mu$ )
工具支持条件	剛性支持 (R) 弾性支持 (弾性体 A, B, C)
引っかき速度	$1.3\ \text{m/sec}$ (振り振り上げ角 $30^\circ$ ) $3.6\ \text{m/sec}$ ( " $90^\circ$ )
切 り 込 み	剛性支持: $2, 5, 8, 12\ \mu$ 弾性支持: $5, 8, 12\ \mu$

#### 4-1 試 料

Al 合金, Cu 合金が精密機械要素として利用される場合, その表面に鏡面仕上げの要求されることが多い。したがって最近その要請の多いジュラルミン系合金と耐蝕合金および電鍍銅を試料として選んだ。

表 4-1-1 Al 合金の成分表

試 料	成 分 (%)						熱 処 理
	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	そ の 他	
24 S	3.8~4.8	1.2~1.8	0.4~1.0	0.5 以下	0.6 以下	Cr: 0.25以下 Zn: 0.1以下	$500^\circ\text{C}$ 水中冷却 7日間常温時効
25 S	4.0~5.0	—	0.5~1.2	0.5~1.2	0.6 以下	—	$510\sim 530^\circ\text{C}$ 水中冷却 $120\sim 160^\circ\text{C}$ で $12\sim 24\ \text{hr}$ 焼戻
56 S	0.1 以下	4.9~5.6	0.05~0.2	0.3 以下	0.4 以下	Cr: 0.05 ~0.5	熱処理はせず, 冷間加工状態で使用

#### 4-1-1 Al 合金

Al 合金の試料には表 4-1-1 に示した 3 種類を用いた。いずれも鍛造丸棒 (200 mm $\phi$ ) から 30 $\times$ 40 $\times$ 5 mm の板状に削りだしたもので、表面をダイヤモンドバイトで精密切削した後バフ仕上げで鏡面としたものである。切削条件を表 4-1-2 に示した。バフ仕上げによる鏡面には多少うねりが残るがあらさは 0.2  $\mu$  程度であった。

表 4-1-2 Al 合金試料面の切削条件

	前 加 工	仕 上 加 工
使用工具	超硬バイト	ダイヤモンドバイト
刃先丸み半径	0.4 R	0.3 R
主軸回転数	900 r.p.m	1,980 r.p.m
切り込み	0.1 mm	0.01 mm
送り	0.025 mm/rev	0.025 mm/rev
切削液	軽油	軽油

#### 4-1-2 電 鋳 銅

これは Al 合金を母材として、その表面に銅を電気メッキしたものである。メッキ条件を表 4-1-3 に、メッキ後の加工条件を表 4-1-4 に示した。Al 合金に比べると電鋳銅はバフ仕上げ

表 4-1-3 銅のメッキ条件

硫酸銅液	硫酸銅 210 g/l
	硫酸 42 ml/l
電流密度	4 A/dm <sup>2</sup>
液温	40°C
所要時間	20 hr.
メッキ厚	約 0.4 mm

表 4-1-4 電鋳銅のメッキ後の加工条件

	前 加 工	仕 上 加 工
使用工具	ハイス 4 種 0.2 R 剣バイト	ダイヤモンド 0.3 R 剣バイト
主軸回転数	1,600 r.p.m	1,600 r.p.m
切り込み	0.1~0.2 mm	0.01 mm, 0.005 mm
送り	0.4 mm/rev	0.4 mm/rev
回数	3 回	各 1 回

げが難しく、容易にこの方法で鏡面を得ることができないので、ダイヤモンドバイトによる精密切削仕上げをそのまま用いた。表面あらさは 1  $\mu$  以下であった。

### 4-1-3 試料表面の硬度

試料面の引っかき実験であるから、その表面の微小硬度を知っておく必要がある。そこで Al 合金 3 種と電鍍銅について、明石製作所製の微小硬度計で表面の硬度を測定した。比較のために表 4-1-5 に示した研磨条件によって、Al 合金 24 S, 56 S の表面を電解研磨し、加工層を取り除いた面についての硬度も測定した。図 4-1-1 に示した測定結果から、試料表面はいずれも加工硬化していることが分った。

表 4-1-5 Al 合金試料の電解研磨条件

電 解 液	磷酸 700 cc 水 100 cc	硫酸 200 cc クロム酸 50~100 g
液 温	室 温	
槽 電 圧	5 V 以 上	
電 流 密 度	10 A/dm <sup>2</sup> 以 上	
電 解 時 間	数	分

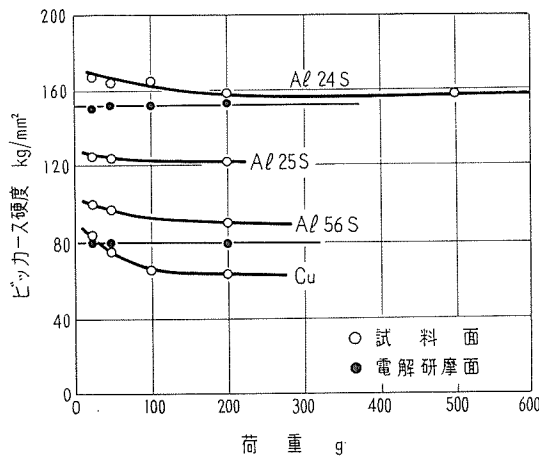


図 4-1-1 試料表面の硬度

引っかきに関する硬度は表面から  $12\mu$  までの深さの硬度である。そこで、測定した硬度がどの程度の深さに対する値であるか計算してみた。使用したダイヤモンド圧子は、対面角  $136^\circ$  の四角錐であるから、いまある荷重で圧子を押し込んだときにできた四辺形圧痕の対角線長さを  $l$  とすれば、圧子の押し込み深さ ( $d$ ) は次式で与えられる。

$$d = \frac{l}{2\sqrt{2}} \cot 68^\circ = 0.14 l \quad (1)$$

この式から計算した圧子の押し込み深さ ( $d$ ) とその時の荷重との関係を示したのが図 4-1-2 である。図から明らかなように、最小荷重 25 g でも圧子の押し込み深さは  $2\mu$  以上に達していることが分った。

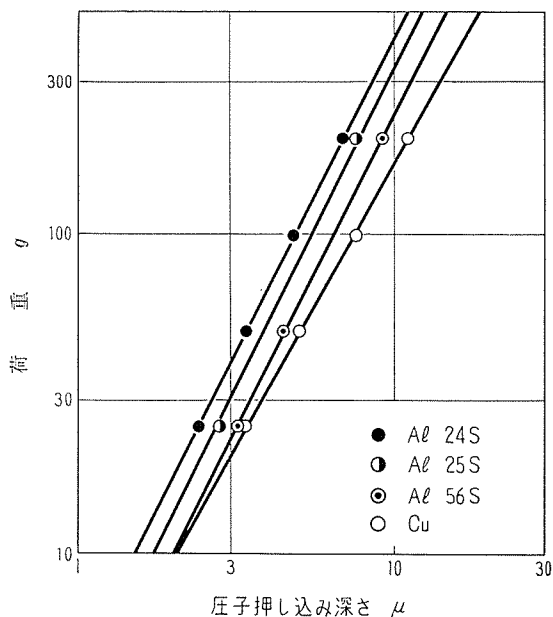


図 4-1-2 圧子押し込み深さと荷重の関係

#### 4-1-4 試料の金属組織

試料の金属組織を調べるために表 4-1-6 に示したエッチング液を用いてエッチングを行ない、その表面を顕微鏡で観察した。その結果、各試料は図 4-1-3 に模型的に示したような組織をもつことが分った。すなわち、24 S、25 S は垂直面に平板状の析出物がみられ、その幅は 24 S で約 1 mm、25 S で約 0.5 mm であり、そのピッチは 24 S で 0.1~0.7 mm、25 S で 0.1~0.3 mm であった。試料面では棒状あるいは板状断面の細かい析出物が見られ、24 S より 25 S が細かい組織となっていることが分った。また 56 S と電鍍銅は粒状組織で、その大きさは約 0.2~0.3 mm とかなり大きいことが分った。

表 4-1-6 試料のエッチング液成分

試料	液成分
24 S	HCl: 50 cc, HNO <sub>3</sub> : 47 cc, HF: 3 cc
25 S	HF: 1 cc, HNO <sub>3</sub> : 20 cc, H <sub>2</sub> O: 2 cc
56 S	HCl: 50 cc, HNO <sub>3</sub> : 47 cc, HF: 3 cc
Cu	塩化銅アンモン: 1 g, H <sub>2</sub> O: 24 g NH <sub>4</sub> OH: 沈澱ができさらにそれとけるまで加える。

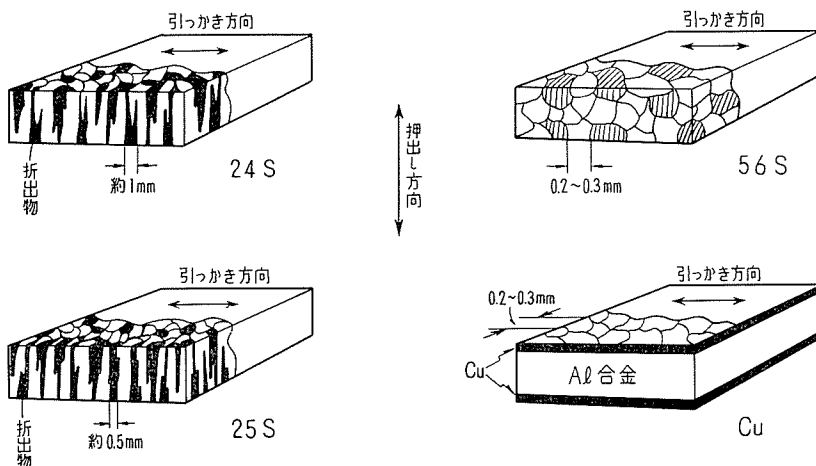


図 4-1-3 試料の金属組織

## 4-2 工 具

工具は頂角  $120^\circ$ 、先端半径  $4.5 \mu$  のダイヤモンド円錐を  $4 \text{ mm}\phi$  のスチール棒の先端中央に埋め込んだもので、その先端形状を図 4-2-1 に示した。図から切り込みが  $\rho_r$  より小さければ先端球部による引っかき、 $\rho_r$  より大きければ先端に丸みをもつ円錐による引っかきとなる。また先端半径 ( $r$ ) を無視すれば切り込みが  $\rho_t$  だけ増加した円錐による引っかきとなる。そこでこの  $\rho_r$ 、 $\rho_t$  を求めると、

$$\rho_r = r(1 - \sin 60^\circ) = 0.60 \mu \quad (2)$$

$$\rho_t = r(\operatorname{cosec} 60^\circ - 1) = 0.70 \mu \quad (3)$$

が得られた。

## 4-3 工具支持条件

### 4-3-1 剛性支持

工具を振子先端に直接固定した場合である。すなわち、ダイヤモンド円錐を埋め込んだスチール棒を Al 合金製の工具支持円板に取り付け、この円板を振子の先端にネジ止めして固定した。

### 4-3-2 弾性支持

この場合は、工具を埋め込んだスチール棒が通るように中央に孔をあけた円板状弾性体を工具支持円板と振子との間にはさみ、ボンドで接着して固定した。使用した弾性体は表 4-3-1

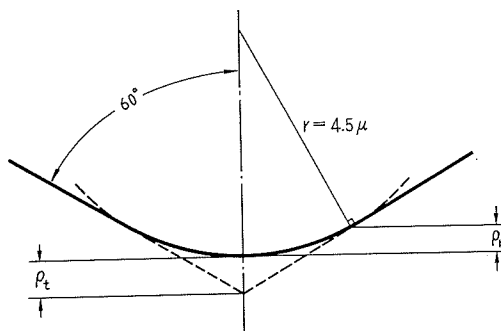


図 4-2-1 ダイヤモンド円錐工具の先端形状

表 4-3-1 工具支持弾性体

材 質	合成ゴム (東洋ゴム工業製造)	発 泡 ゴ ム	
配 合	SBR # 1712	137.5	不 明
	酸化亜鉛	5	
	ステアリン酸	2	
	パラフィン	2.5	
	カーボンブラック	70	
	促進剤 CZ	1.2	
	硫黄	2	
	(蒸気加硫 4 kg/cm <sup>2</sup> ×30分)		
密 度	1 g/cm <sup>3</sup>	0.2 g/cm <sup>3</sup>	
厚 さ	2.3 mm	2.0 mm	5.5 mm
記 号	A	B	C

に示したものである。これらの弾性体の静的および動的特性について次に述べる。

#### i) 静的な特性

弾性体試料に圧縮ひずみを与え、その時の応力とひずみとの関係から静的な弾性率を求めた。圧縮荷重は抵抗線ひずみ計を用いた動力計で、また圧縮ひずみは差動変圧器型の変位計で測定した。この場合の測定値は十分応力が緩和した後の値である。ひずみが弾性体の厚さに比べて小さい場合には、応力とひずみとは直線関係にあり、その勾配から圧縮の弾性率が求められる。この方法で求めた弾性率およびバネ定数を表 4-3-2 に示した。

表 4-3-2 弾性体の静的な弾性率とバネ定数

材 質	合成ゴム (SBR)	発 泡 ゴ ム	
弾 性 率 kg/mm <sup>2</sup>	45.5	2.45	
記 号	A	B	C
厚 さ mm	2.3	2.0	5.5
バネ定数 kg/mm	99	6.0	2.2

#### ii) 動的な特性

引っかけは動的な変形・破壊現象であるから、弾性体についても動的な特性を知っておく必要がある。この実験における引っかけは0.2~0.7 kc/s 程度の現象になるから、この範囲の周波数領域での特性を求めておかなければならない。動的粘弾性定数の測定法には今までに多くの方法が紹介されている。これらは物体に正弦的外力あるいはひずみを与えて、その際発生するひずみあるいは応力を検出し、これを観測周波数の関数として求める方法である。しかし、振動外力あるいはひずみを広い周波数範囲にわたって物体に加え、発生するひずみあるいは応力

を検出することは、測定機の構造あるいは物体の力学的形態の点で種々の制限を受け、単一の測定法ではせいぜい2デカード程度の周波数範囲しかおえないのが普通である。そこで各種測定法を分類して、これと高分子物質に適用しうる周波数範囲との相対的な関係を図4-3-1に示した。この図から0.2~0.7 kc/sの周波数範囲に対しては、(無)付加質量強制振動共振法ある

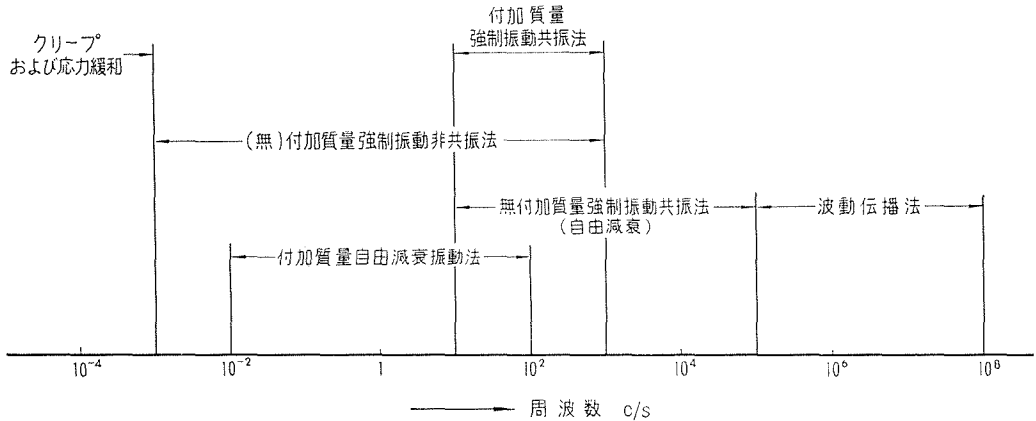


図 4-3-1 粘弾性の動的測定法と可用周波数の関係

いは(無)付加質量強制振動非共振法の4つが上げられる。これから弾性体試料の物理的性質、形状、質量さらに装置の複雑さなどの点を考慮して、ここでは付加質量強制振動共振法の一つである速度共振法を採用した。この方法にはさらに、負荷質量を変化させる方法と周波数を変化させる方法とがあるが、可動部分の質量を連続的に変えることは操作上困難であるので、負荷質量は一定として周波数を変化させる方法を用いた。この速度共振法の簡単な理論<sup>18)</sup>は次のようなものである。

いま弾性体の厚さを  $L$ 、断面積を  $S$  とし、可振部の質量を  $M$  とおく。なお弾性体の質量は  $M$  に比べて十分小さいとして無視した。弾性体に加わる周期的外力を  $F_0 \cos \omega t$  とすれば、可振部の運動方程式は、

$$M\ddot{x} + R\dot{x} + Kx = F_0 \cos \omega t \quad (4)$$

となる。ここに  $R$ 、 $K$  は抵抗係数、弾力係数で、粘性係数  $\eta$  および弾性率  $E$  に形状係数  $S/L$  を乗じたものである。

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{S}{L} \eta \\ K &= \frac{S}{L} E \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(4) 式を標準形に書き直せば、

$$\ddot{x} + 2\epsilon\dot{x} + n^2x = H \cos \omega t \quad (6)$$

を得る。ここに各係数は次式で与えられる。

$$2\varepsilon = \frac{S}{ML} \eta, \quad n^2 = \frac{S}{ML} E, \quad H = \frac{F_0}{M} \quad (7)$$

この方程式の定常解はよく知られているように次式で与えられる。

$$x = \frac{H}{\sqrt{(n^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega^2}} \cos(\omega t - \phi) \quad (8)$$

ただし  $\phi$  は次式で与えられる。

$$\tan \phi = \frac{2\varepsilon \omega}{n^2 - \omega^2} \quad (9)$$

したがって変位速度 ( $\dot{x}$ ) は、

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{\omega H}{\sqrt{(n^2 - \omega^2)^2 + 4\varepsilon^2 \omega^2}} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \phi\right) \\ &= V \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - \phi\right) \end{aligned} \quad (10)$$

となり、速度振幅 ( $V$ ) は振動率 ( $\omega$ ) の関数で、ある振動率で最大となる。この現象が速度共振である。共振振動率 ( $\omega_r$ ) と共振振幅  $V_r$  は、 $\partial V / \partial \omega = 0$  とおいて次式のように求められる。

$$\left. \begin{aligned} \omega_r &= n \\ V_r &= \frac{H}{2\varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

これから明らかなように、上の2つの量を測定して、(7) および (11) 式から  $\eta$ ,  $E$  を求めることができる。しかし、この場合の共振曲線 (図 4-3-2) について考えれば、振幅が共振振幅の  $1/\sqrt{2}$  となる振動率 ( $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ) の間の幅 (共振曲線の幅) を  $\Delta\omega$  として次式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} 2\varepsilon &= \Delta\omega \\ n &= \omega_r \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

したがって実際には、共振曲線を解析して弾性体の粘性率 ( $\eta$ ), 弾性率 ( $E$ ) を求めることができる。

以上述べた速度共振法による測定原理を図 4-3-3 に示した<sup>19), 20)</sup>。弾性体は磁場内を平行に移動できるように平行バネで支えられた Al 合金製の可振部 (円筒状で可動コイルと一体になっている) の一端にボンドで接着する。弾性体の他の面は、台上をスライドできる支え板にボンドで接着し、支え板はこの状態で台上に固定される。

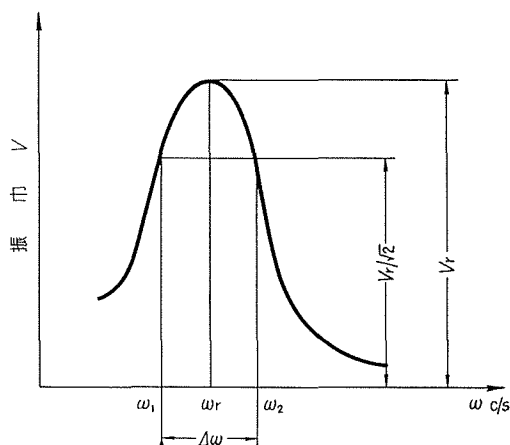


図 4-3-2 速度共振曲線

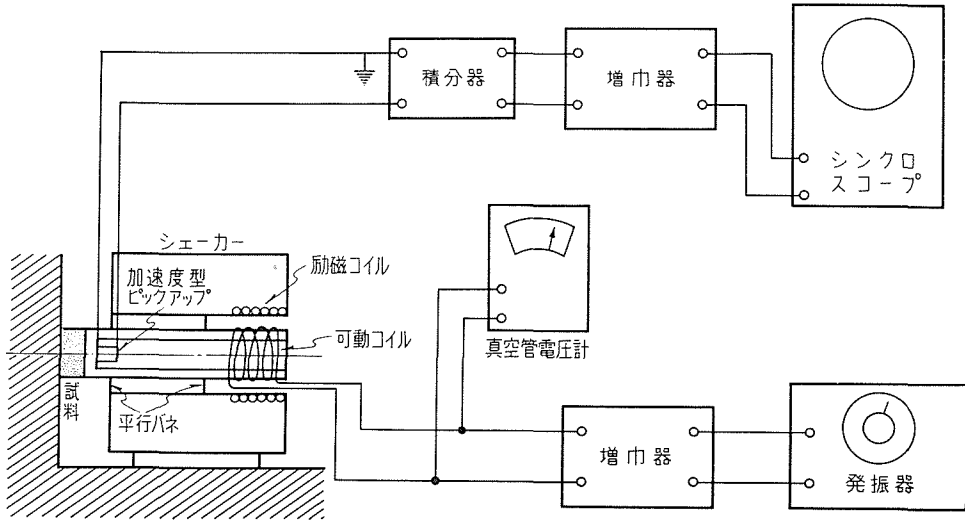


図 4-3-3 弾性体の動特性測定原理

弾性体がこの状態で多少圧縮されていたとしても、特性にはほとんど影響はない。測定を行なうには、発振器からの出力を増幅して可動コイルを振動させ、弾性体に周期的伸長、圧縮を与える。この状態を可振部に取り付けた加速度型ピックアップで検出し、その出力を積分器を通して速度に比例する量に交換する。さらに、この出力を増幅した上シンクロスコープで観測する。発振器の周波数を連続的に変えて出力を観測すれば速度共振曲線が得られる。外力の大き

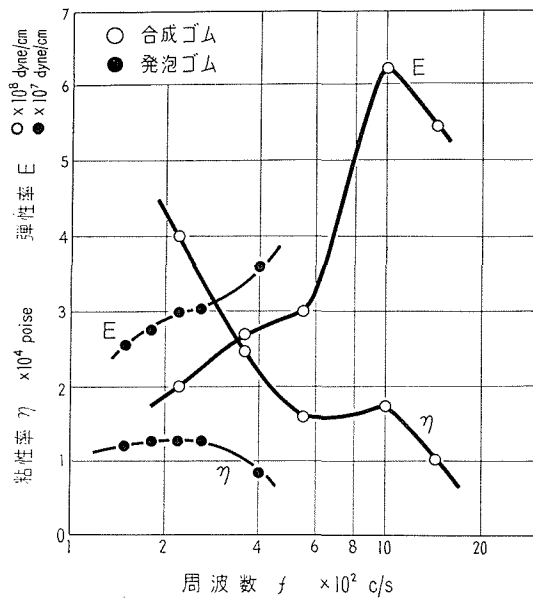


図 4-3-4 工具支持弾性体の動特性

さは、発振器からの出力を増幅した後、真空管電圧計によってコイルを流れる電流を測定して決定する。さらに弾性体の寸法、可振部の質量を変えて共振周波数を変化させれば、粘弾性率の分散を求めることができる。

この方法で得た合成ゴムおよび発泡ゴムの動特性を図4-3-4に示した。

#### 4-4 引っかかり速度<sup>12),13),14)</sup>

引っかかり速度はストップウォッチによって振子の振動周期を測定し、振幅による補正を行なって算出することができる。まず振子の運動方程式を考える(図4-4-1参照)。振子の質量を  $M$ 、振子の重心から回転軸までの距離を  $h$ 、振子の回転軸に関する慣性モーメントを  $I$  とし、振子の軸の鉛直に対する傾き角を  $\alpha$  とすれば、運動方程式は次式で与えられる。

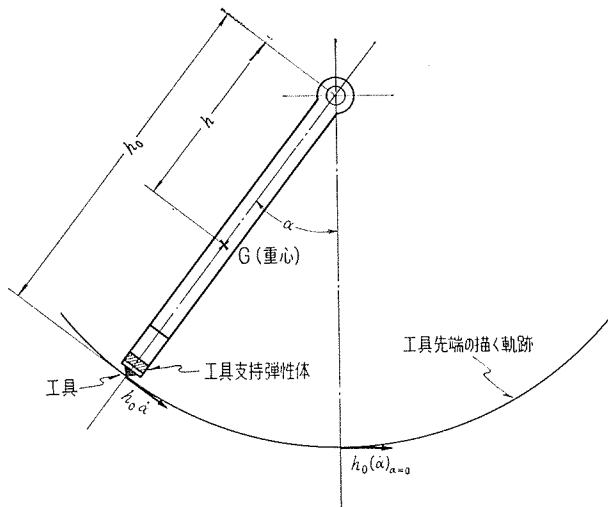


図 4-4-1 振子の回転運動

$$I\ddot{\alpha} = -Mgh \sin \alpha \quad (13)$$

ここで  $\sin \alpha \cong \alpha - \frac{1}{6}\alpha^3$  とおくと、

$$\ddot{\alpha} + \frac{Mgd}{I}\alpha - \frac{Mgh}{6I}\alpha^3 = 0 \quad (14)$$

を得る。この方程式の振動数の第2近似値 ( $p_1$ ) は、初期条件として  $t=0$  で  $\alpha=\alpha_0$ 、 $\dot{\alpha}=0$  を用いて、次式で与えられる。

$$p_1^2 = \frac{Mgh}{I} - \frac{Mgh}{8I}\alpha_0^2 \quad (15)$$

ゆえに周期 ( $T$ ) は、

$$T = \frac{2\pi}{p_1} \cong 2\pi\sqrt{\frac{I}{Mgh}} \left(1 + \frac{1}{16}\alpha_0^2\right) \quad (16)$$

となる。ここで微小角振幅に対する基準周期 ( $T_0$ ) は, (13) 式で  $\sin \alpha \doteq \alpha$  とおいて次式のように求められる。

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{I}{Mgh}} \quad (17)$$

(16), (17) 両式から  $T$  と  $T_0$  の関係が,

$$T_0 = T\left(1 + \frac{1}{16}\alpha_0^2\right) \quad (18)$$

として求められる。

いっぽうエネルギー方程式から初期条件を考慮して,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}I(\dot{\alpha})^2 &= Mgh(\cos \alpha - \cos \alpha_0) \\ \therefore \dot{\alpha} &= \sqrt{\frac{Mgh}{I}} \sqrt{2(\cos \alpha - \cos \alpha_0)} \end{aligned} \quad (19)$$

を得る。これに (17) 式を使えば次式が得られる。

$$\dot{\alpha} = \frac{2\pi}{T_0} \sqrt{2(\cos \alpha - \cos \alpha_0)} \quad (20)$$

したがって、振子が鉛直位置にきたときの振子先端の速度 ( $V$ ) は、振子の回転中心から先端までの距離を  $h_0$  とし、 $V = h_0(\dot{\alpha})_{\alpha=0}$  となるから、

$$V = \frac{2\pi}{T_0} h_0 \sqrt{2(1 - \cos \alpha_0)} \quad (21)$$

が得られる。

周期は振子に  $60^\circ$  の振り上げ角を与えて振りおろし、約  $30^\circ$  に減衰するまでの回数  $n$  とその時間  $nT$  sec を 10 回測定して平均周期 ( $T$ ) を計算した。その結果、 $n=15\sim 16$  で  $T=1.22$  sec を得た。この値と平均角振幅 ( $\alpha_0=\pi/4$ ) を用いて (18) 式から  $T_0=1.18$  sec を得た。この  $T_0$  と  $h_0=0.48$  m とを (21) 式に代入して、任意の振り上げ角 ( $\alpha_0$ ) を与えたときの引っかかり速度は次式から求められる。

$$V = 3.6(1 - \cos \alpha_0)^{1/2} \text{ m/sec} \quad (22)$$

振り上げ角 ( $\alpha_0$ ) を変えたときの引っかかり速度を (22) 式から計算して表 4-4-1 に示した。

表 4-4-1 引っかかり速度

$\alpha_0$	$1 - \cos \alpha_0$	引っかかり速度 m/sec	$\alpha_0$	$1 - \cos \alpha_0$	引っかかり速度 m/sec
$\pi/6$	0.134	1.3	$\pi/3$	0.500	2.8
$\pi/4$	0.293	2.0	$\pi/2$	1.000	3.6

#### 4-5 切込み

この実験では切り込み精度が実験データの信頼性を左右する。そこで剛性支持による引っ

かきによって得られた引っかき痕の深さから、切り込みの精度検定<sup>22)</sup>を行なった。その結果、切り込みは  $+0.034 \mu$  の定差をもつことが分った。これは切り込みの0点を定める際に、切り込みは完全な0ではなく、工具は多少試料表面に切り込んでいることを暗示するものである。

点推定法によれば、各測定値の確率誤差の推定値 ( $\hat{f}$ )、および最確値の確率誤差の推定値 ( $\hat{f}_0$ ) はベッセルの公式から、 $\hat{f}=0.258 \mu$ 、 $\hat{f}_0=0.0230 \mu$  であることが分った。したがって、切り込みの推定値 ( $d$ ) は与えた切り込みを  $d_0$  とし、 $d=d_0+0.034\pm 0.023 \mu$  で与えられる。

また区間推定法によれば、信頼係数を0.99として、

切り込みの信頼区間:  $d_0+0.034\pm 0.077 \mu$

分散の信頼区間: [0.113, 0.200]

信頼係数を0.95とすれば、

切り込みの信頼区間:  $d_0+0.034\pm 0.058 \mu$

分散の信頼区間: [0.120, 0.184]

となった。これを  $d_0=2, 5, 8, 12 \mu$  の場合について誤差を百分率で示したのが表4-5-1である。

表 4-5-1 切 込 み 誤 差

切込み $d_0 \mu$	切込み誤差 %		切込み $d_0 \mu$	切込み誤差 %	
	信頼係数 0.99	信頼係数 0.95		信頼係数 0.99	信頼係数 0.95
2	+ 5.55	+ 4.60	8	+ 1.39	+ 0.767
	- 2.15	- 1.20		- 0.538	- 0.200
5	+ 2.22	+ 1.84	12	+ 0.925	+ 0.767
	- 0.860	- 0.480		- 0.358	+ 0.200

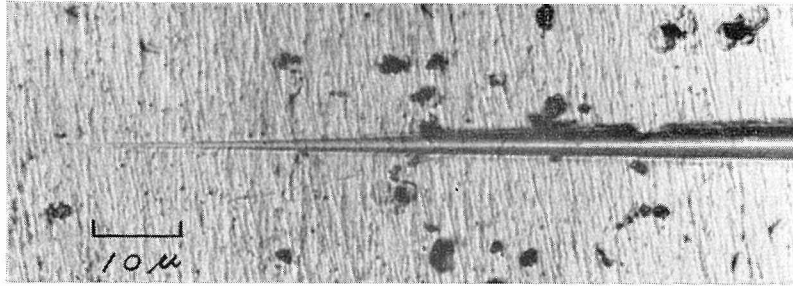
## 5. 結果と考察

### 5-1 顕微鏡による引っかき痕の観察

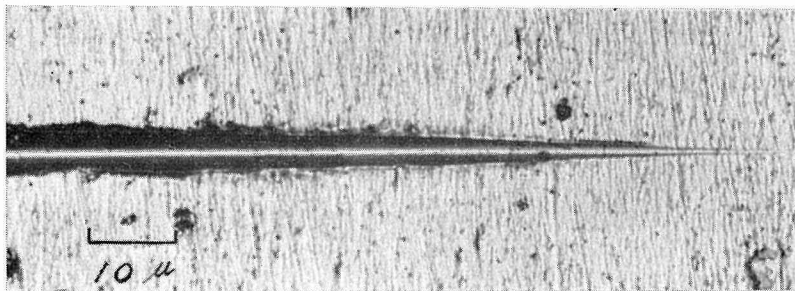
#### 5-1-1 喰い込み部と離脱部

切り込みは円弧状に変化するから、その始めと終りにおける切り込みは微小であり、特異な性状を示すものと思われる。そこで工具が試料に喰い込んでいく始めの部分と工具が試料から離脱していく終りの部分を、各々引っかき痕の喰い込み部、離脱部と呼ぶことにする。図5-1-1~図5-1-13にAl合金3種および電鍍銅試料についての喰い込み部と、離脱部の写真を示した。

この部分で第1に観察されるのは、工具先端球部による摩擦痕である。この摩擦痕は工具が試料に喰い込んでいく前、および離脱の最終状態で起り、切削加工におけるのと同じラビング現象によるものと考えられる。この部分では、工具は単に試料面上をすべっている状態にあり、その開始点あるいは離脱部での終了点は明らかでない。この点は表面からの腐蝕によって



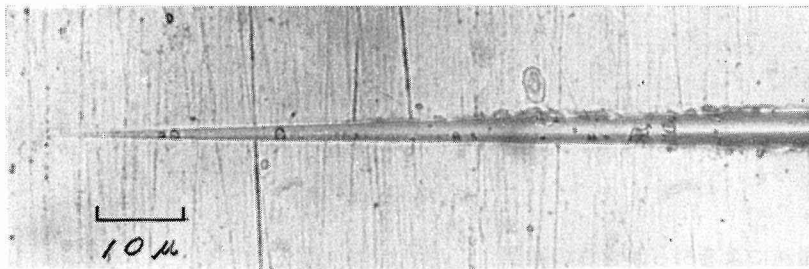
A. 喰い込み部



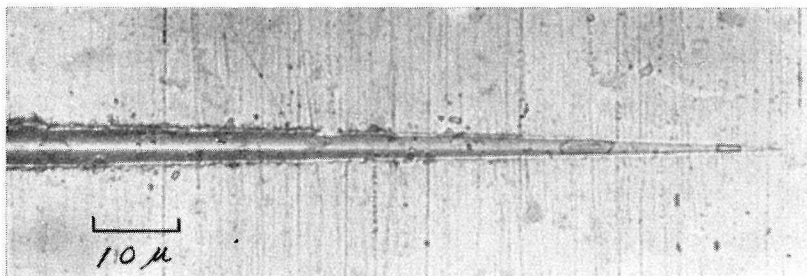
B. 離脱部

Al 24 S, 剛性支持, 切込み:  $8 \mu$ , 引っかき速度: 1.3 m/sec

図 5-1-1 引っかき痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真



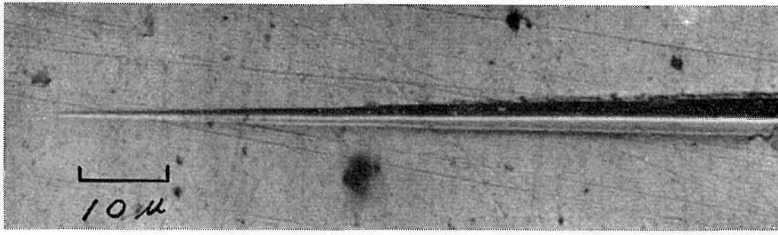
A. 喰い込み部



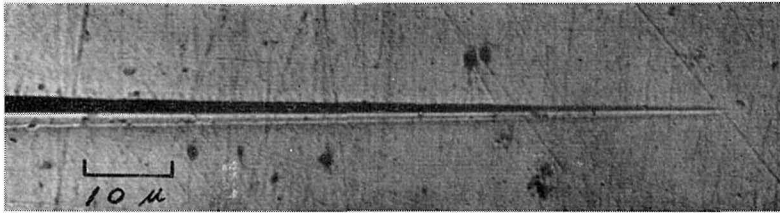
B. 離脱部

Al 25 S, 剛性支持, 切込み:  $8 \mu$ , 引っかき速度: 3.6 m/sec

図 5-1-2 引っかき痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真

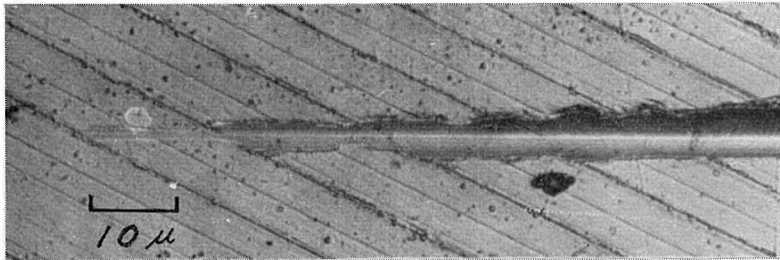


A. 喰い込み部

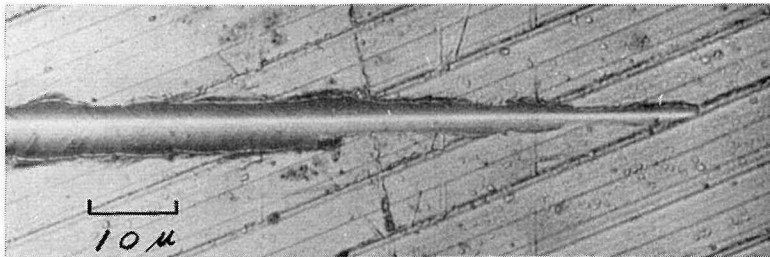


B. 離脱部

Al56S, 剛性支持, 切込み:  $8\mu$ , 引っかかり速度: 1.3 m/sec  
 図 5-1-3 引っかかり痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真

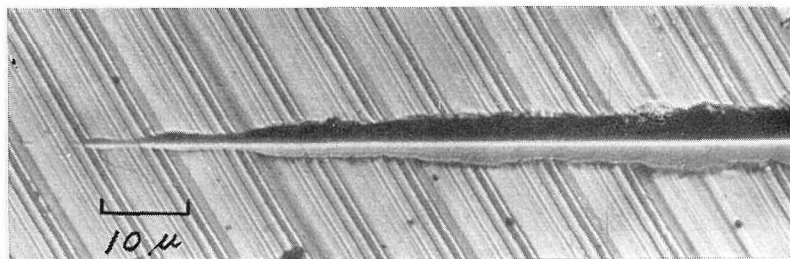


A. 喰い込み部

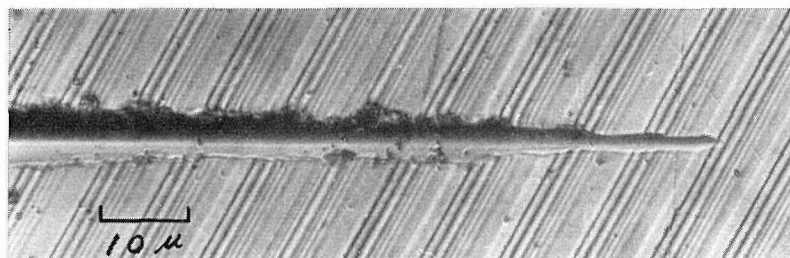


B. 離脱部

Cu, 剛性支持, 切込み:  $8\mu$ , 引っかかり速度: 3.6 m/sec  
 図 5-1-4 引っかかり痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真



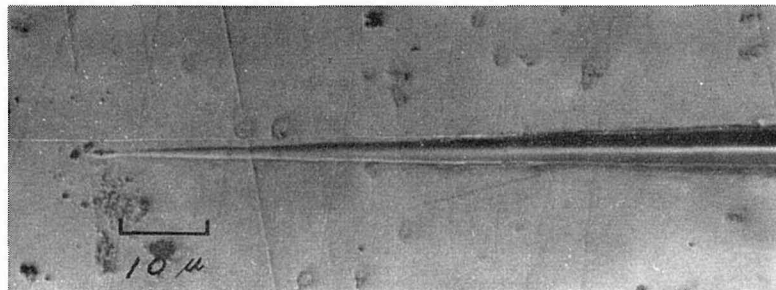
A. 喰い込み部



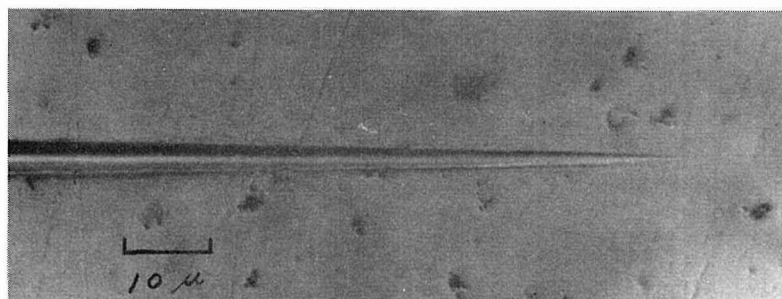
B. 離脱部

Cu, A 弾性体支持, 切込み:  $12 \mu$ , 引っかき速度: 3.6 m/sec

図 5-1-5 引っかき痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真



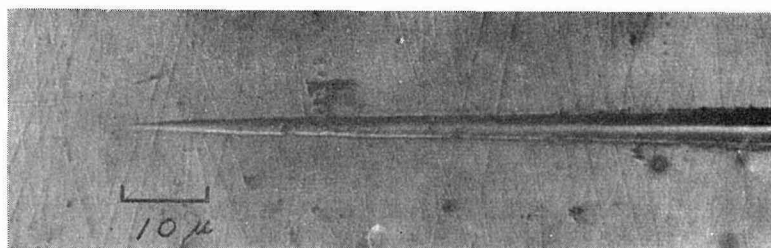
A. 喰い込み部



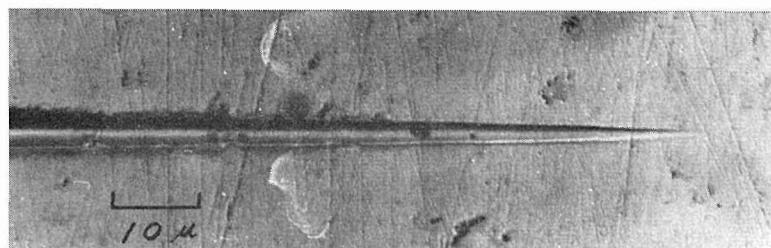
B. 離脱部

Al 24 S, B 弾性体支持, 切込み:  $12 \mu$ , 引っかき速度: 3.6 m/sec

図 5-1-6 引っかき痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真



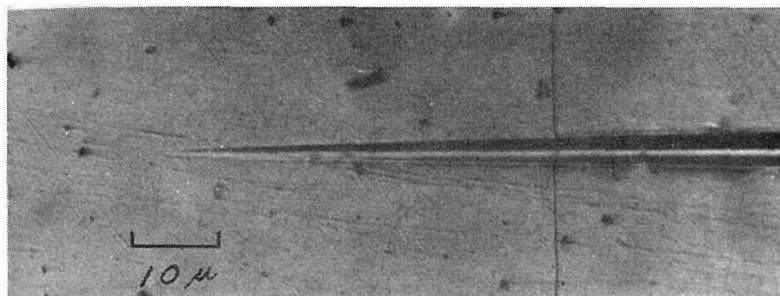
A. 喰い込み部



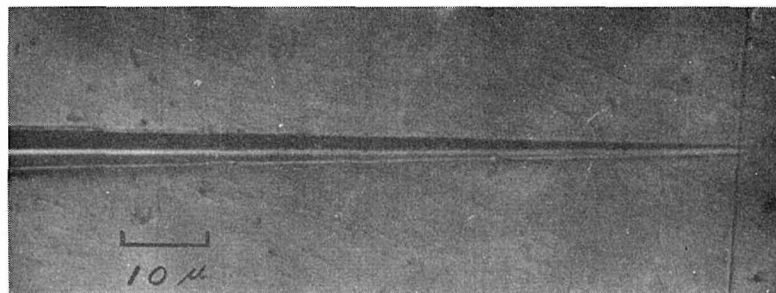
B. 離脱部

Al 25 S, B 弾性体支持, 切込み:  $12 \mu$ , 引っかき速度: 1.3 m/sec

図 5-1-7 引っかき痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真



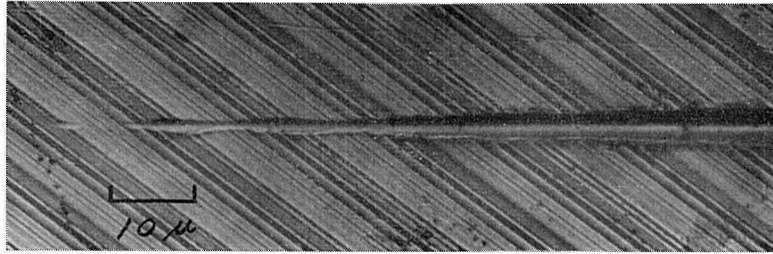
A. 喰い込み部



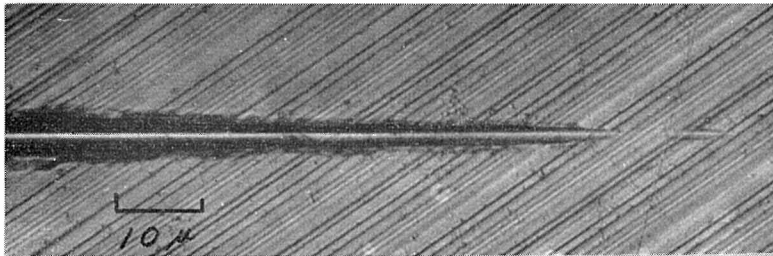
B. 離脱部

Al 56 S, B 弾性体支持, 切込み:  $12 \mu$ , 引っかき速度: 3.6 m/ssc

図 5-1-8 引っかき痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真



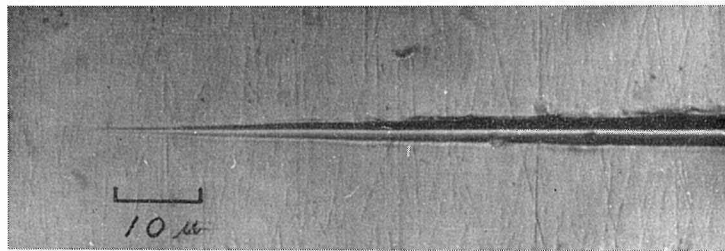
A. 喰い込み部



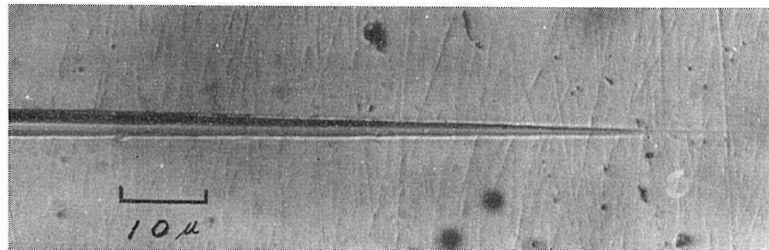
B. 離脱部

Cu, B 弾性体支持, 切込み:  $12\mu$ , 引っかかり速度: 1.3 m/sec

図 5-1-9 引っかかり痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真



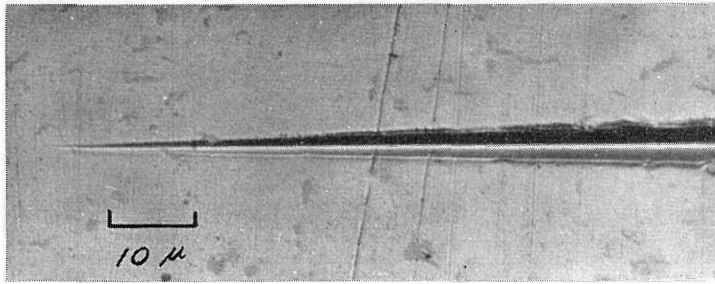
A. 喰い込み部



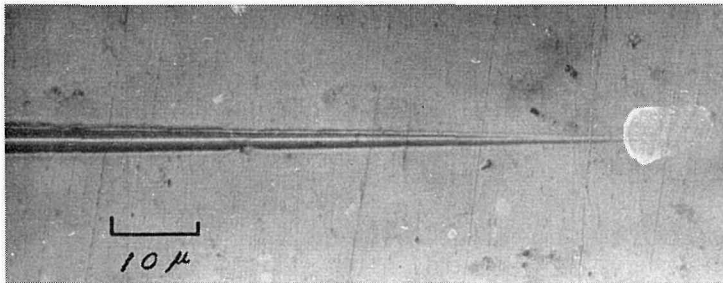
B. 離脱部

Al 24 S, C 弾性体支持, 切込み:  $12\mu$ , 引っかかり速度: 1.3 m/sec

図 5-1-10 引っかかり痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真



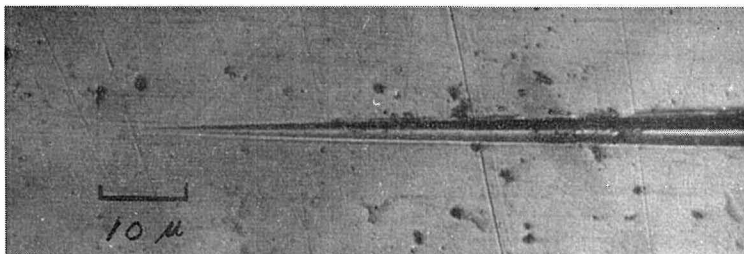
A. 喰い込み部



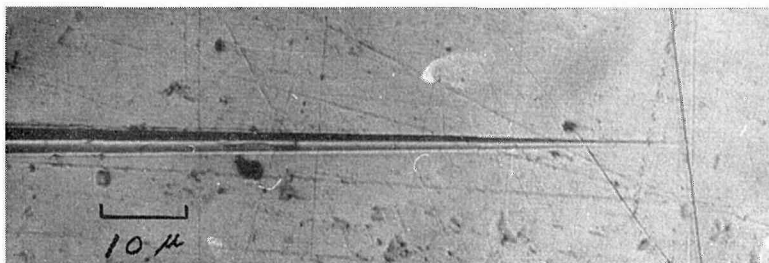
B. 離脱部

Al 25 S, C 弾性体支持, 切込み:  $12 \mu$ , 引っかかり速度: 1.3 m/sec

図 5-1-11 引っかかり痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真



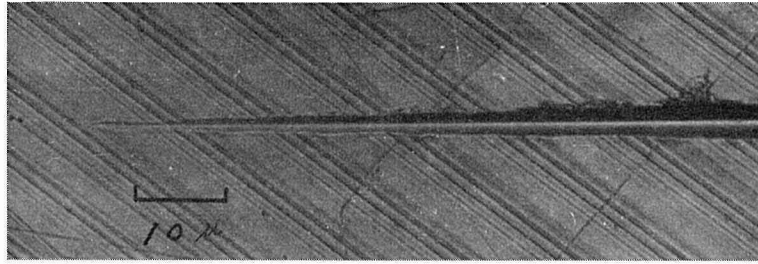
A. 喰い込み部



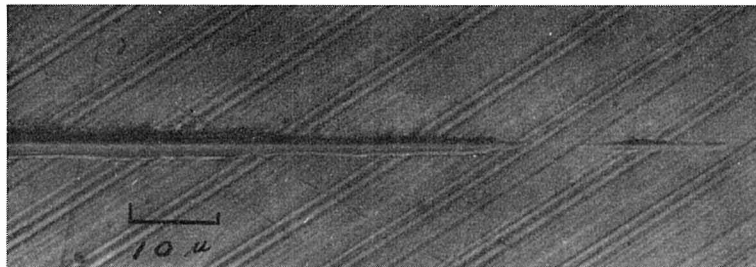
B. 離脱部

Al 56 S, C 弾性体支持, 切込み:  $12 \mu$ , 引っかかり速度: 1.3 m/sec

図 5-1-12 引っかかり痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真



A. 喰い込み部



B. 離脱部

Cu, C 弾性体支持, 切込み:  $12\mu$ , 引っかかり速度: 1.3 m/sec

図 5-1-13 引っかかり痕の喰い込み部と離脱部の顕微鏡写真

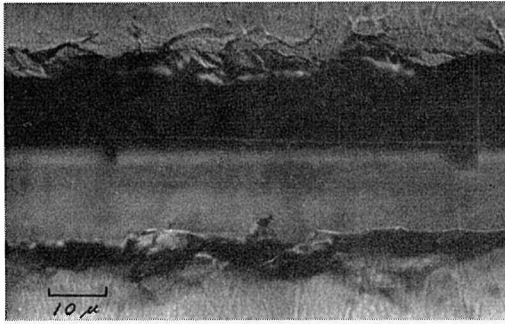
組織の乱れを観察すれば推定できるであろうと考えられる。

工具を弾性体で支持すると、この摩擦痕は長く続くのが認められたが、この傾向は喰い込み部よりも離脱部における方が著しい。これは 2-3-2 で述べたように、工具支持弾性体は振子の回転運動による遠心力のために伸びていて、喰い込み部では切り込みが大きくなったと同じ効果をもち、引っかかり抵抗のために工具はゆるやかな勾配をもって試料から離脱して行くためと考えられる。

さらに、摩擦痕に続く比較的切り込みの浅い部分では、表面のバフ仕上げによる細かいきずがそのまま引っかかり痕内に残っており、また、引っかかり痕の縁には明らかにもり上りが認められる。したがってこの部分では材料は切りくずを排出することなしに、小さな塑性流動によって溝が形成されたとみることができる。この部分もまた工具を弾性支持することによって、離脱部で長く続いているのが観察された。

### 5-1-2 中央部

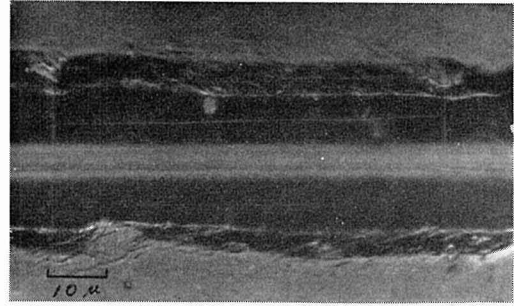
引っかかり痕の喰い込み部と離脱部では材料による性状の差は明らかでないが、引っかかり痕の中央部では材料による差が認められるようになる。図 5-1-14~図 5-1-17 に各材料に対する引っかかり痕中央部の写真を示した。引っかかり痕の縁にはかなり大きなもり上りが観察され、このもり上りは Al 合金 25 S が比較的規則的で変化が少ないのに対し、56 S, 電鍍銅ではもり上りが断続して不規則であり、24 S はこれらの中間の規則性を示している。このもり上りの規則性は、電鍍銅の場合は表面にダイヤモンドバイト切削によるツールマークが残っており面のあ



引っかけき方向

Al 24 S, 剛性支持, 切込み:  $8 \mu$ , 引っかけき速度: 3.6 m/sec

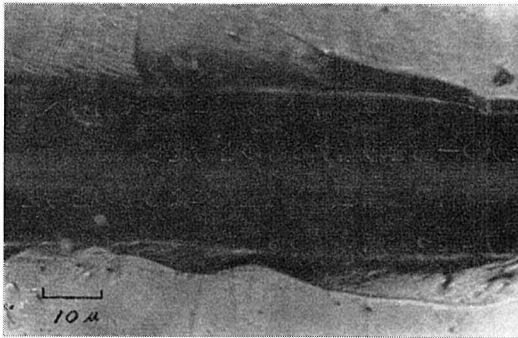
図 5-1-14 引っかけき痕中央部の顕微鏡写真



引っかけき方向

Al 25 S, C 弾性体支持, 切込み:  $12 \mu$ , 引っかけき速度: 1.3 m/sec

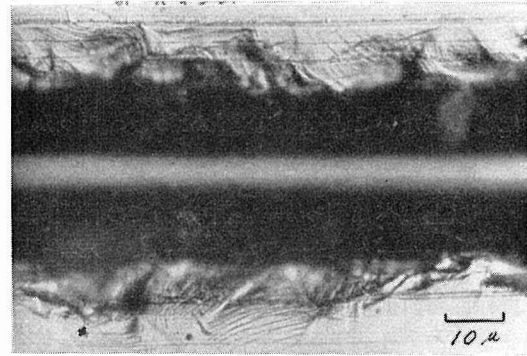
図 5-1-15 引っかけき痕中央部の顕微鏡写真



引っかけき方向

Al 56 S, B 弾性体支持, 切込み:  $8 \mu$ , 引っかけき速度: 3.6 m/sec

図 5-1-16 引っかけき痕中央部の顕微鏡写真



引っかけき方向

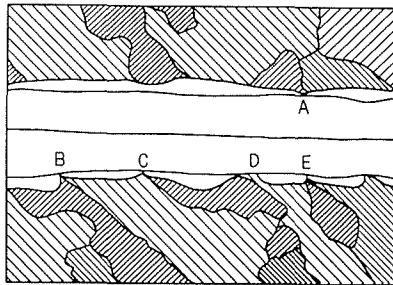
Cu, 剛性支持, 切込み:  $8 \mu$ , 引っかけき速度: 3.6 m/sec

図 5-1-17 引っかけき痕中央部の顕微鏡写真

らさの影響も考慮しなければならないが、Al 合金の場合には同じバフ仕上面であることから、おもに試料表層部の組織の相違によるものであると思われる。

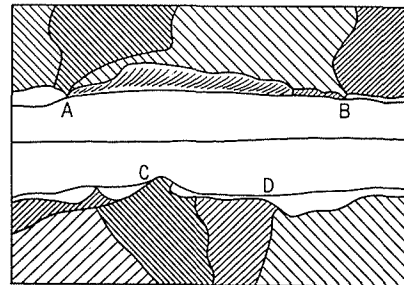
そこで引っかけき痕部をエッチングして組織との関係を調べた結果、図 5-1-18 と -19 に示したように、もり上りの不連続点は結晶粒界あるいは析出物の境界と一致することが分った。したがって、25 S, 24 S, 56 S の順でもり上りの不規則性が大きくなるのは、4-1-4 で述べたように結晶粒が 25 S, 24 S, 56 S の順で大きくなることに原因すると考えられる。

もり上りの形状については、その幅、すなわち引っかけき痕の縁の塑性変形域は 25 S が最も狭く、もり上り高さは逆に最も高いように見える。これに反して 56 S、電鍍銅では高くもり上らずに、幅が広くなっており、24 S はこれらの中間の形状を示す。この形状の差はおもに材料の機械的性質によるものと考えられる。これらのもり上り形状と材料の組織および機械的性質との関係については、引っかけき痕形状の定量的測定と合わせて 5-2 で述べる。



Al 24 S, 剛性支持, 切込み:  $12\ \mu$   
 引っかかり速度: 3.6 m/sec  
 A~E はもり上りの不連続点と, 折出物あるいは結晶粒界が一致する点を示す。

図 5-1-18 もり上りと組織の関係



Al 56 S, 剛性支持, 切込み:  $12\ \mu$   
 引っかかり速度: 3.6 m/sec  
 A~D はもり上りの不連続点と, 結晶粒界が一致している点を示す。

図 5-1-19 もり上りと組織の関係

さらにもり上り部分には, 引っかかり方向に対して斜め後方に向ってすべり線が並んでいるのが観察された。また引っかかり痕の内部は比較的なめらかで, 引っかかりの際切りくずの排出もほとんどないことを考え合わせると, 引っかかりの際工具前面の材料は掘り起こされて前方へ押し出されると同時に左右に押し分けられてもり上りの一部を形成するものと考えられる<sup>23)</sup>。

以上述べた引っかかり痕中央部での特徴はおもに材料の組織と機械的性質によるものと考えられ, 事実工具を弾性体で支持した場合にも本質的に変った点は認められなかった。しかし支持弾性体の変形が大きくなって, 工具と材料の接触状態が全く異なるような場合には, 材料の変形機構も変るものと思われる。なお工具を弾性体で支持した場合にも, 工具先端の通過を示す引っかかり痕底部の線は直線で, 工具は蛇行していないことが分った。

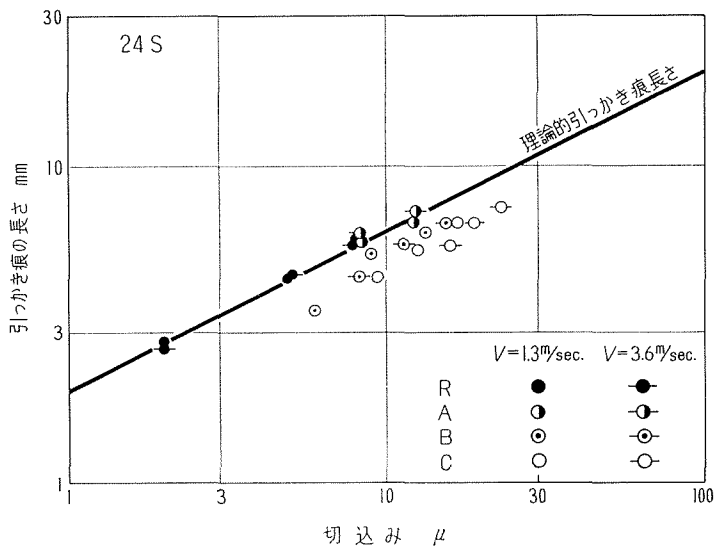


図 5-2-1 切込みに弾性体の伸びを考慮した場合の引っかかり痕の長さ

5-2 引っかき痕形状

5-2-1 引っかき痕の長さ

剛性支持による引っかきの場合には、2-2で述べたように与えた切り込みに対して理論的引っかき痕長さが計算されるが、弾性支持の場合には振子の回転運動による弾性体の変形と、引っかき抵抗による変形を考慮しなければならないため、引っかき痕の長さを理論的に簡単に計算することはできない(2-3参照)。したがって与えた切り込みに対する引っかき痕の長さを

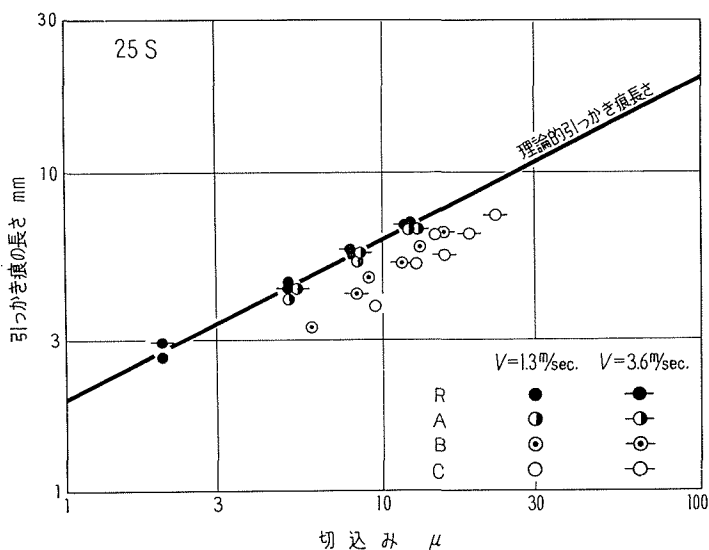


図 5-2-2 切り込みに弾性体の伸びを考慮した場合の引っかき痕の長さ

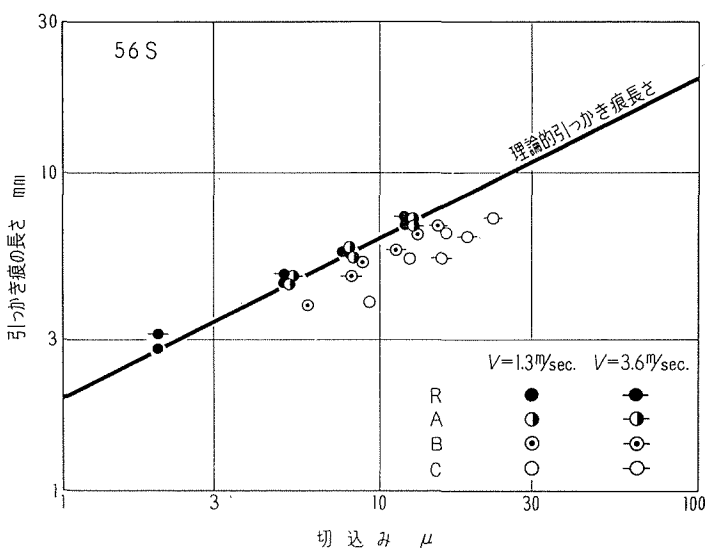


図 5-2-3 切り込みに弾性体の伸びを考慮した場合の引っかき痕の長さ

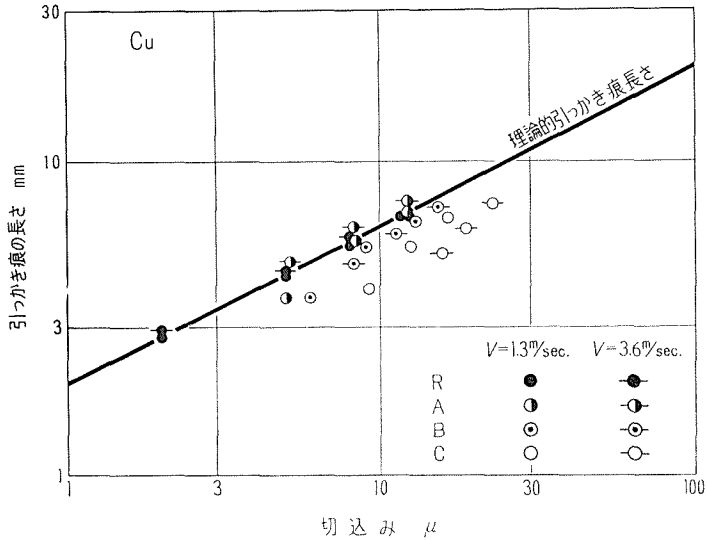


図 5-2-4 切込みに弾性体の伸びを考慮した場合の引っかき痕の長さ

考える一つの目安として、切り込みに振子の回転運動による伸び (2-1 で計算した) を加えたものを採用することにした。この切り込みと引っかき痕の長さとの関係を図 5-2-1～図 5-2-4 に示した。剛性支持の場合には理論的引っかき痕長さと一致しており、最もバネ定数の大きい A 弾性体支持の場合にはこの剛性支持の場合とあまり差はない。B, C 弾性体による支持の場合にはいずれも理論的曲線の下にあり、特にバネ定数の最も小さい C 弾性体支持の場合には明らかな速度効果が見られる。すなわち、切り込みとして弾性体の伸びを考慮して引っかき痕の

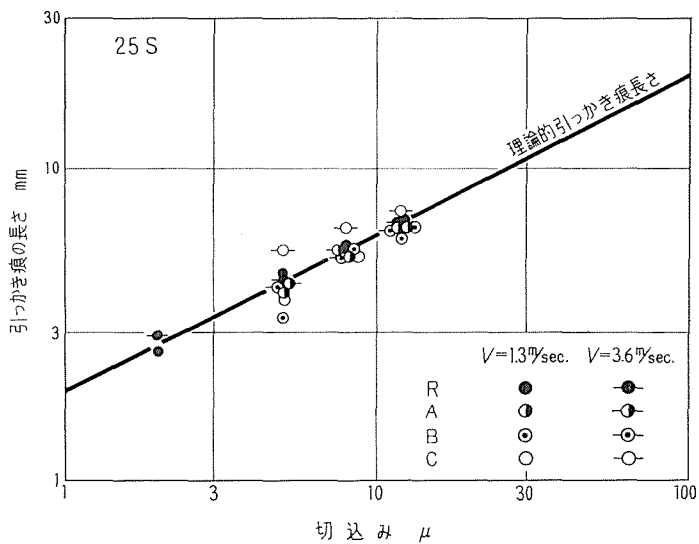


図 5-2-5 切込みに弾性体の伸びを考慮しない場合の引っかき痕の長さ

長さを整理すると、引っかき痕の長さの大小は支持弾性体のバネ定数の大小と一致し、バネ定数が大きくなるにつれて剛性支持の場合の理論的引っかき痕長さに近づいていく。また引っかき速度が増すと引っかき痕の長さは減少し、この傾向は、バネ定数の小さい弾性体の場合に著しい。

ところが切り込みに伸びを考慮しない場合には、図 5-2-5 で示した 25 S についての一例のように、速度効果は見かけ上逆になる。さらに見かけ上の引っかき痕の長さは B 弾性体支持では剛性支持の場合より短かいのに、C 弾性体支持ではこれより長くなっており、バネ定数との対応がつかない。したがって切り込みとしては伸びを考慮したものを基準にとるのが妥当と考えられる。

### 5-2-2 縦断面形状

#### i) 剛性支持の場合

図 5-2-6 に一例として 25 S について、切り込みを変えた場合の引っかき痕の深さと左右のもり上り高さを示した。深さは振子の先端が描く理論的な円弧と一致している。剛性支持の場合の深さは材料が変わってもやはり理論的な円弧と一致していた。しかし左右のもり上り高さ

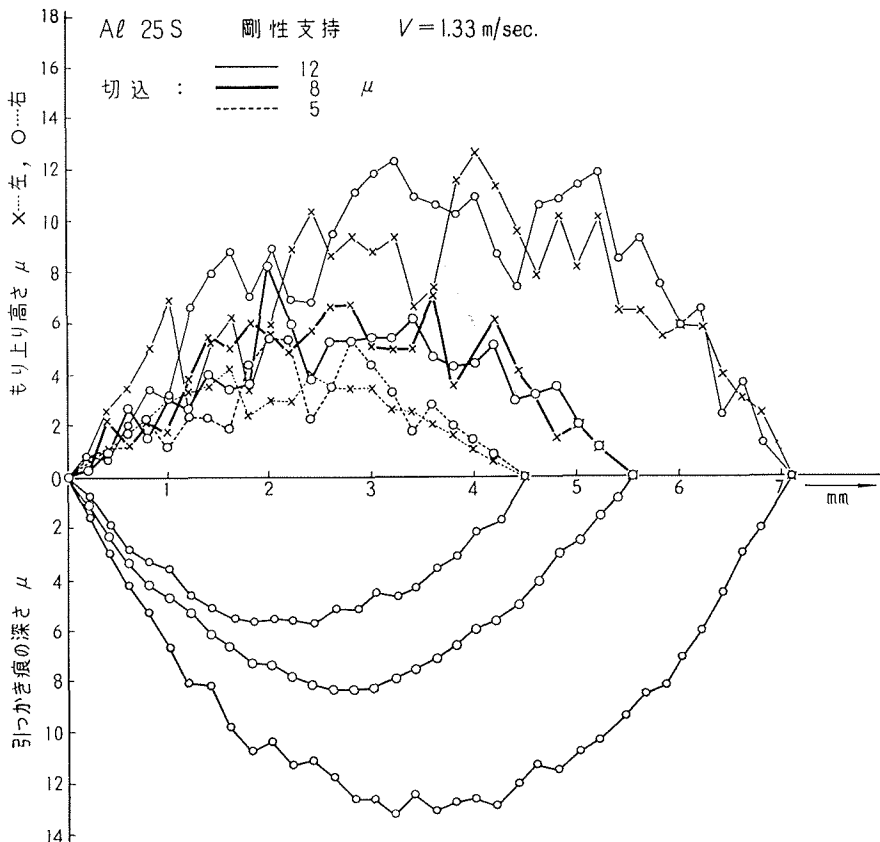


図 5-2-6 引っかき痕の縦断面形状

は5-1の顕微鏡観察で述べたように、その不規則性、断続の様子は材料によって明らかに差があることが認められた。

そこで図5-2-7に各材料に対するもり上り高さを示した。図から分るように25Sが最も規則的で変化が少なく、これに対して不規則なのは56Sと電鍍銅で高さの変化も25Sに比べて相当に激しい。しかし相対的に高さが最も高いのは25Sである。またこのもり上り高さが不規則な変化をはじめるのは、引っかき痕の深さが約 $2\mu$ に達するあたりからである。これらもり上り高さの不規則性は材料の組織および機械的性質とに関係があるが、この関係について

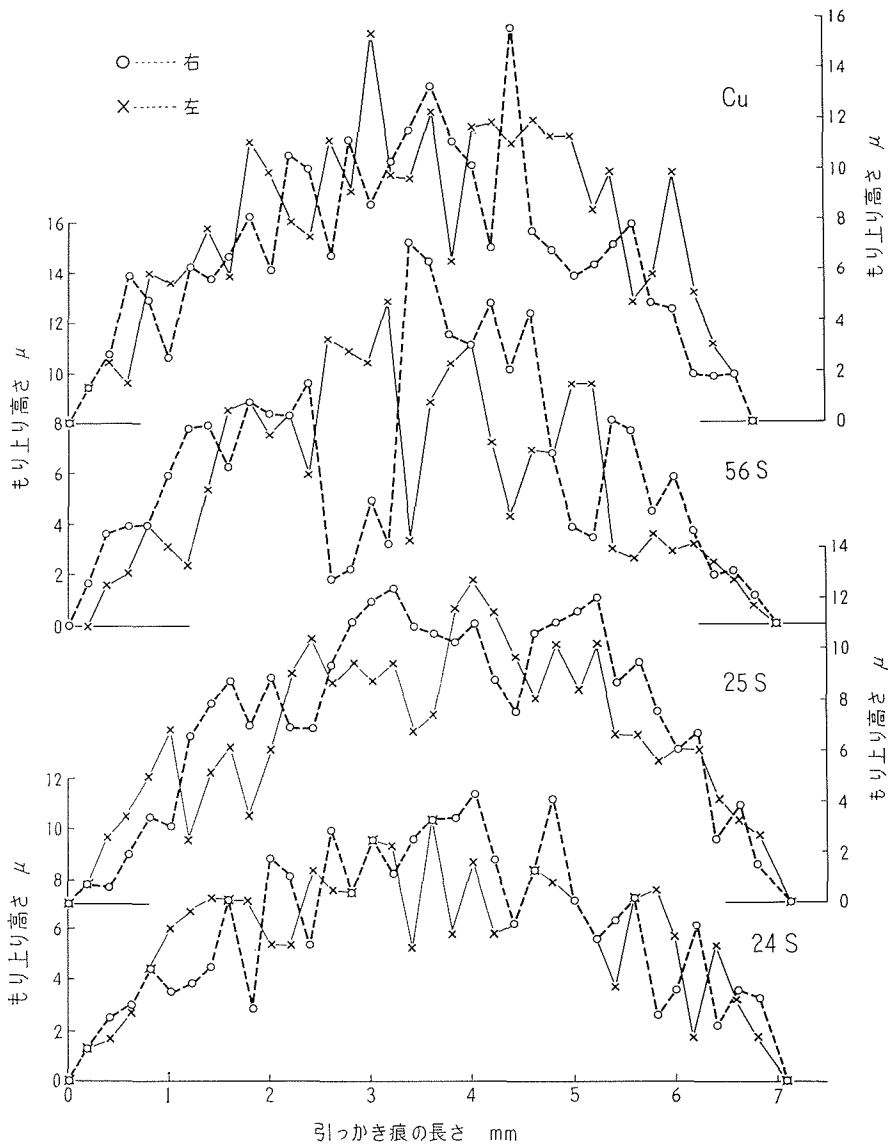


図 5-2-7 各材料に対するもり上り高さ

は5-2-4でまとめて述べる。

ii) 弾性支持の場合

工具を弾性体で支持した場合、もり上り高さの不規則性やその断続の様子などは、各材料について剛性支持の場合について述べた特徴を示し、弾性支持による本質的な相違は認められなかったが、引っかき痕の深さについては明らかな相違が認められた。

そこで図5-2-8～図5-2-11に各材料ごとに工具支持条件を変えた場合の引っかき痕の深さを示した。図から明らかなようにいずれの材料の場合にも、支持弾性体のバネ定数が小さくなるにつれて引っかき痕の底は浅くなり、いわゆる舟底形の形状に近づくことが分かる。さらに喰い込み部と離脱部に着目すれば、喰い込み部ではいずれの支持条件についてもその傾斜は剛性支持の場合と同じであるが、離脱部の傾斜は支持弾性体のバネ定数が小さい程ゆるやかとな

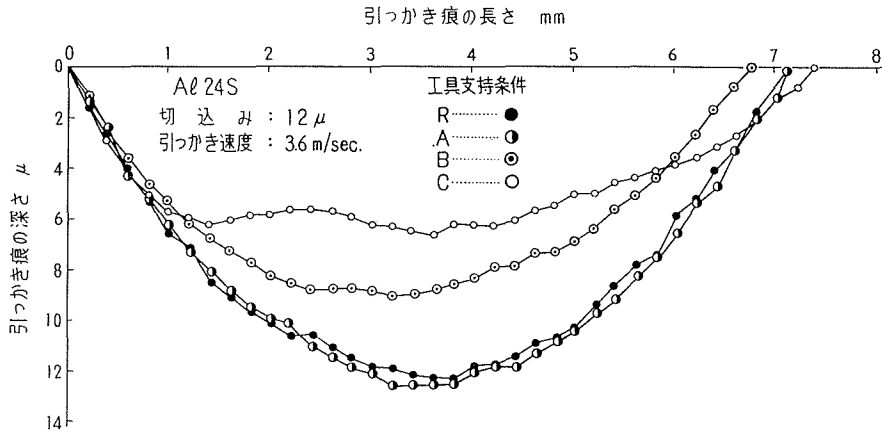


図 5-2-8 工具支持条件を変えた場合の引っかき痕の深さ

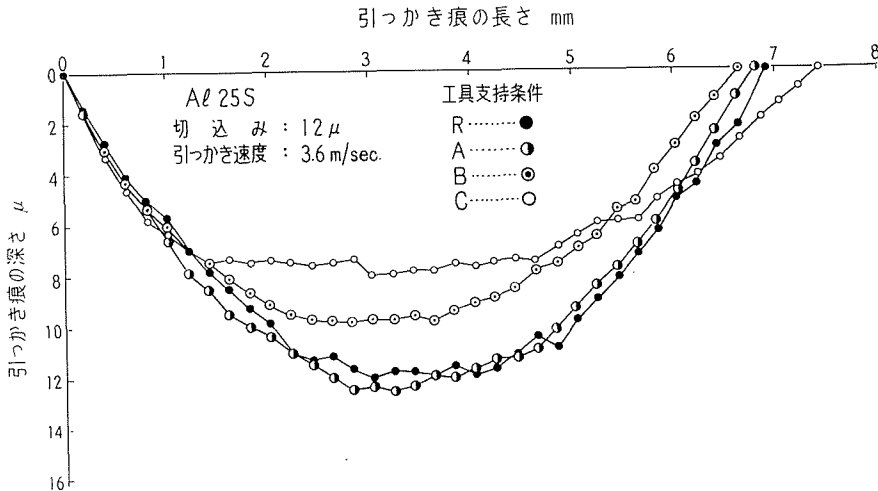


図 5-2-9 工具支持条件を変えた場合の引っかき痕の深さ

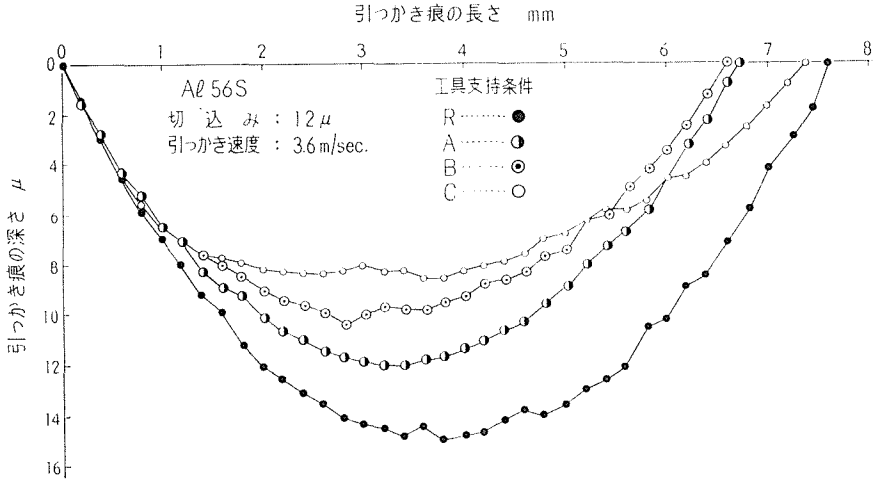


図 5-2-10 工具支持条件を変えた場合の引っかけ痕の深さ

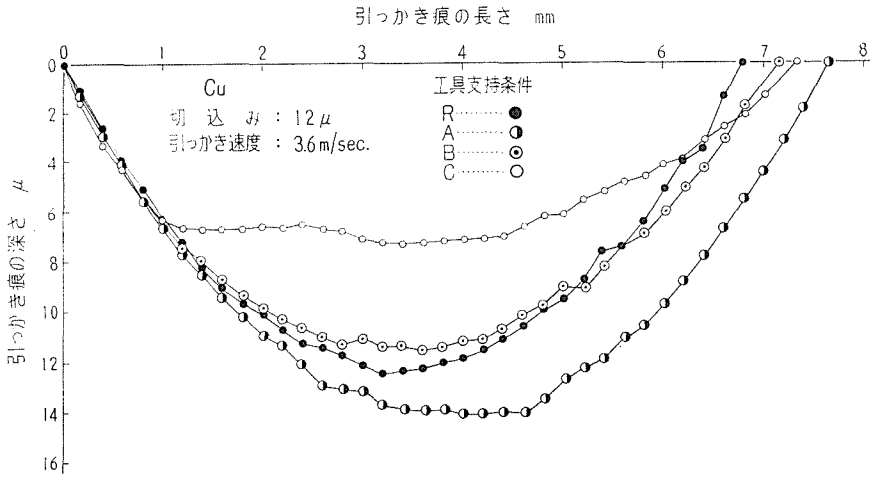


図 5-2-11 工具支持条件を変えた場合の引っかけ痕の深さ

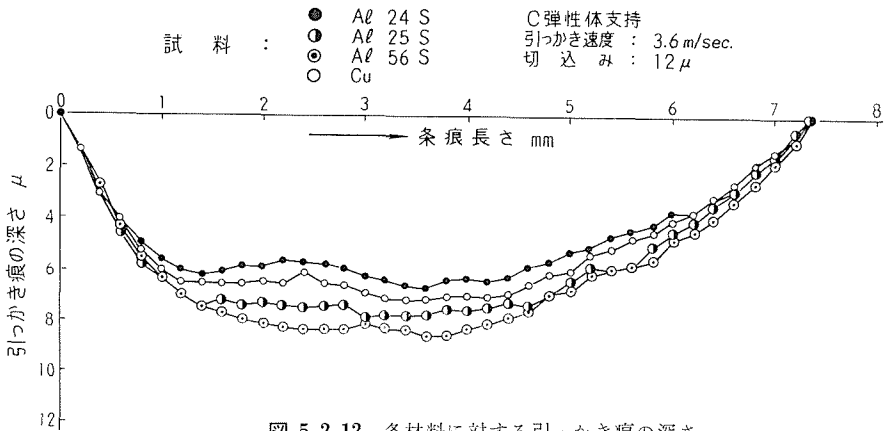


図 5-2-12 各材料に対する引っかけ痕の深さ

っている。これは 2-3-2 で計算した結果と定性的には一致している。

さて材料による形状の違いをみるために、C 弾性体支持の場合の引っかき痕の深さを示したのが図 5-2-12 である。引っかき痕の深さは 24 S, 電鍍銅, 25 S の順に深くなり、この順位は Al 合金の場合には 4-1-3 で述べた試料の硬度の低下の順序に一致し、一応硬度で説明できる。しかし電鍍銅の場合には、硬度は Al 合金 3 種より低いので硬度では説明できない。電鍍銅の表面は 4-1-2 で述べたようにダイヤモンドバイトによる精密切削面で、Al 合金の試料面に比べてあらさが 1 桁大きいので深さ測定の誤差によるものと考えられる。

次に C 弾性体支持の場合について、引っかき痕の深さに対する速度効果を調べた。図 5-2-13 と図 5-2-14 が 24 S と 25 S についての実験結果である。引っかき速度 3.6 m/sec の場合の深さには、速度 1.3 m/sec では見られなかった波がのっており、さらに深さと引っかき痕の長さは増加していることが分かった。この波は引っかき中に工具がジャンピングしたことを示す

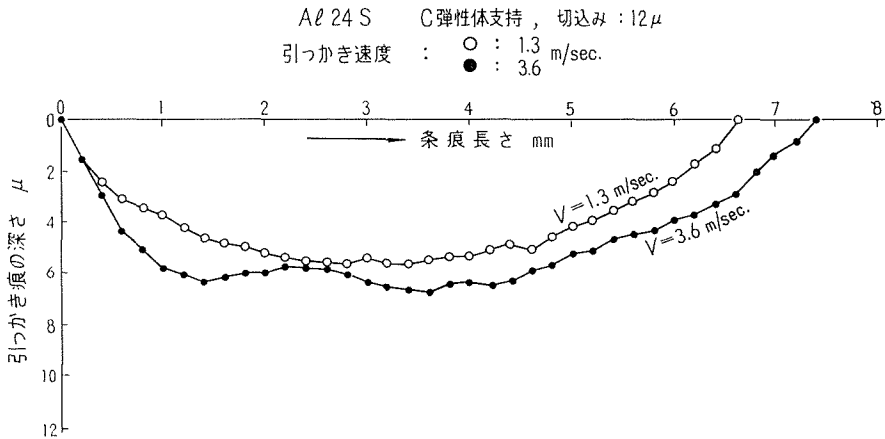


図 5-2-13 引っかき痕の深さに対する速度効果

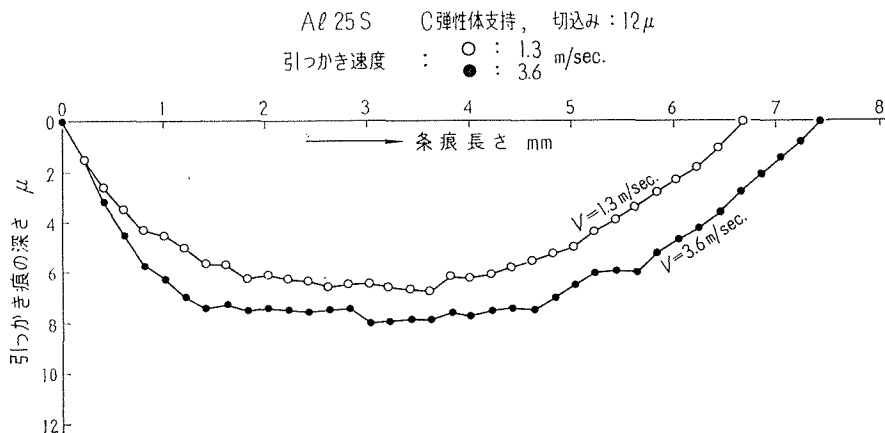


図 5-2-14 引っかき痕の深さに対する速度効果

ものと考えられるので、この波の周波数を計算しさらにこの周波数における支持弾性体のバネ定数を求め、このバネ定数を使って工具および支持円板と弾性体とで形成される振動系の固有振動数を比較してみた。ところがこの波から計算した周波数は約 1.5 kc/s で、弾性体の動特性はこの周波数までのデータがでていないため直接比較はできなかったが、逆にバネ定数を推定すると約 60 kg/mm となり、一応妥当な値と考えられる。なお、さらに柔らかい弾性体を用いた場合に引っかかり痕が 2~3 つに切れることがすでに観察されている<sup>24)</sup>。

### 5-2-3 横断面形状

引っかかり痕の両側のもり上り高さが相当不規則で変化も激しいことを前述したが、図 5-2-15~図 5-2-18 に示したようにもり上り幅もまた高さと同じように不規則であり、しかもその不規則性と幅の変化の材料による差もいくつかみられた。すなわち、25 S ではもり上り幅は最も規則的で変化が少なく、次に 24 S、56 S の順で不規則となり幅の変化も激しくなってくる。もり上り幅の大小関係では、25 S が最もその幅が狭く、24 S、56 S の順に幅は広がっている。電鍍銅の場合には 56 S と同程度の不規則性と幅をもっている。なおこの材料によるもり上り幅の特徴は、支持条件によって変ることにはなかった。

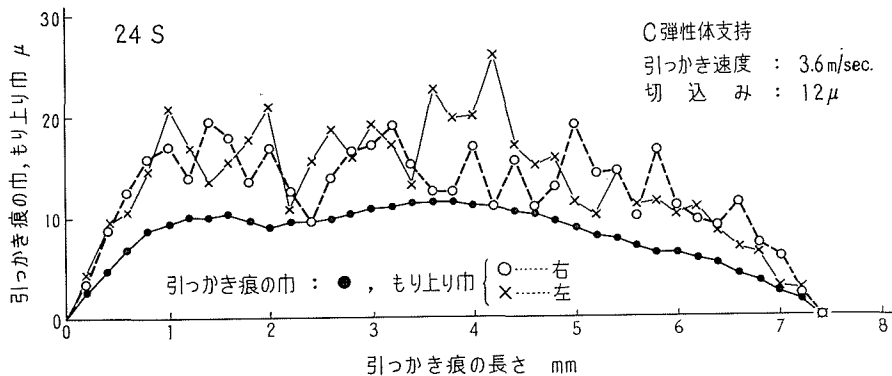


図 5-2-15 引っかかり痕の幅ともり上り幅

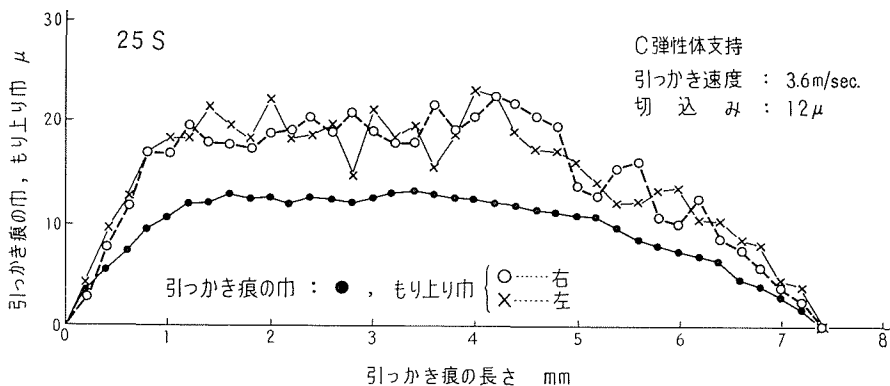


図 5-2-16 引っかかり痕の幅ともり上り幅

このように引っかき痕形状はもり上り高さ、幅ともかなり複雑で、引っかき痕のある一点についての横断面形状を調べてもその形状が材料についての特徴を示すとは期待できない。そこで形状を調べようとする点の近傍の横断面形状を幾つか測定し、測定の際の断面のスケッチによる補正を施してこれを横断面形状と呼ぶことにした。図5-2-19と図5-2-20はこの方法で求めた25Sについての剛性支持による引っかき痕の中央部の横断面形状である。図から明らかのように、切り込みが変わっても形状は相似を保ち、本質的な違いは認められず、またこの実験での引っかき速度に対しては速度効果は認められなかった。

さらに支持条件を変えた場合についても図5-2-21に示したように、バネ定数の低下とと

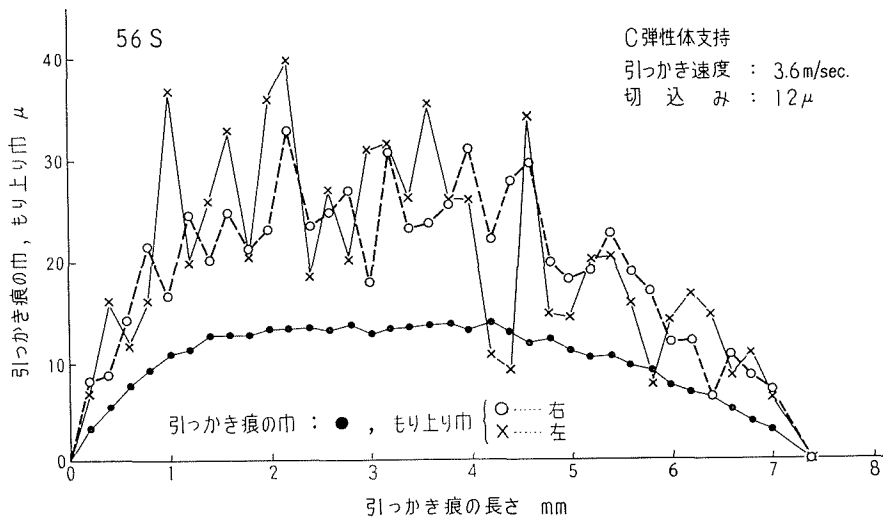


図 5-2-17 引っかき痕の幅ともり上り幅

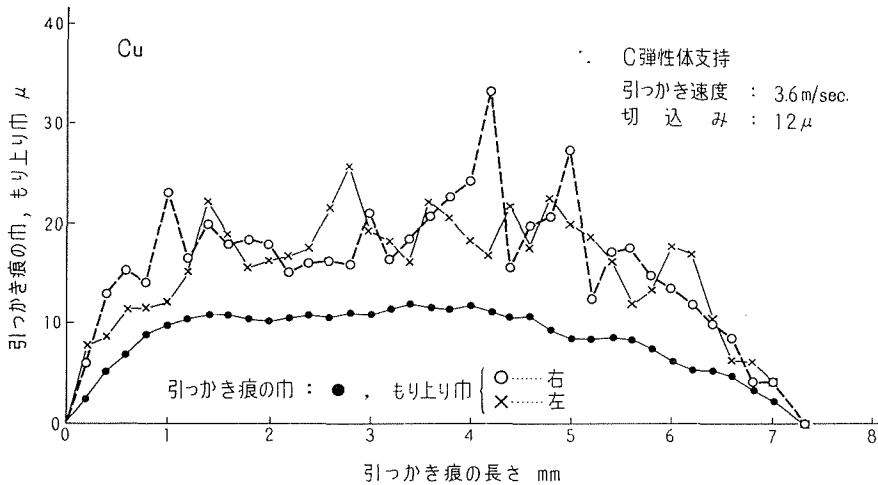
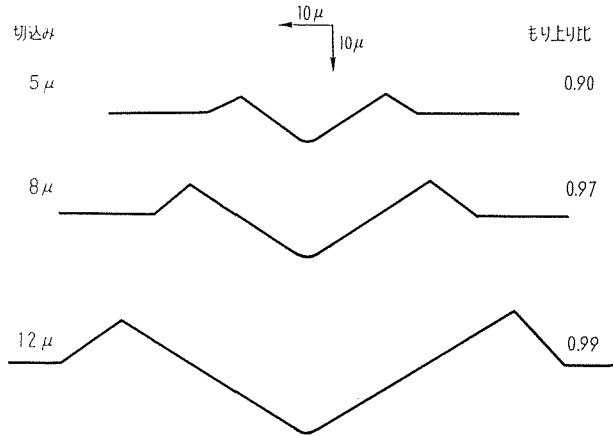
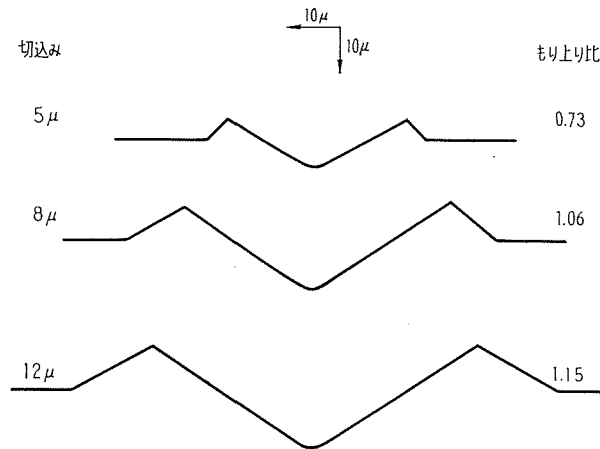


図 5-2-18 引っかき痕の幅ともり上り幅



Al 25 S, 剛性支持, 引っかかり速度: 1.3 m/sec

図 5-2-19 引っかかり痕の横断面形状

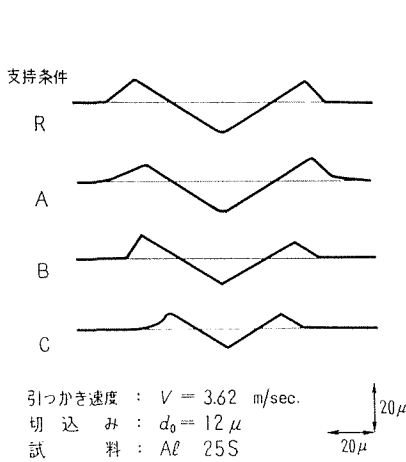


Al 25 S, 剛性支持, 引っかかり速度: 3.6 m/sec

図 5-2-20 引っかかり痕の横断面形状

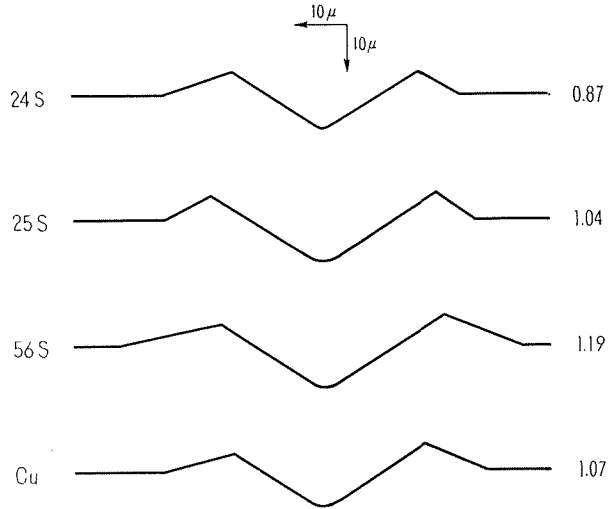
もに引っかかり痕の深さは減少していくが、形状の本質的な変化は認められなかった。またいずれの場合にも、引っかかり痕の深さと幅は 2-3-1 で求めた幾何学的関係を満足していることも分かった。

そこで C 弾性体支持の場合の各試料に対する横断面形状をとって、材料による形状の特徴を調べたのが図 5-2-22 である。図の右側に記した数字は 2-3-1 で定義したもり上り比で、いずれの場合もこの比は約 1 であり、また引っかかり中に切りくずの排出が認められなかったことから、この実験における引っかかりは切りくずの生成をともしないものであることが分かった。またこの比が 1 を越えるのは、形状を三角形で近似したことによる誤差と、測定誤差によるものと考えられる。



引っかけ速度 :  $V = 3.62$  m/sec.  
 切込み :  $d_0 = 12 \mu$   
 試料 : Al 25S

図 5-2-21 支持条件を変えた場合の横断面形状



C 弾性体支持, 切込み:  $12 \mu$ , 引っかけ速度:  $3.6$  m/sec

図 5-2-22 引っかけ痕の横断面形状と材料の関係

5-2-4 もり上り係数

各材料についての引っかけ痕形状を定量的に表示するために、2-3-1 で定義したもり上り係数を調べた。これには各材料について、光切断法で測定した横断面からもり上り係数を求めその平均値を各材料に対するもり上り係数とした。もり上りの形状は先に述べたように相当に不規則であったが、もり上り係数の  $\alpha, \beta$  はともに左右のもり上り高さおよび幅の平均値で、予想された程のばらつきはなく材料によるもり上り形状の違いを定量的に示しうることが分った。また支持条件や引っかけ速度が変わってももり上り係数には大きな変化がみられなかったのので、引っかけ条件を無視して、各材料についての平均値を求め、表 5-2-1 に示した。

表 5-2-1 各材料のもり上り係数

材 料	もり上り係数		材 料	もり上り係数	
	$\alpha$	$\beta$		$\alpha$	$\beta$
24 S	0.714	0.771	56 S	0.650	0.916
25 S	0.759	0.738	Cu	0.727	0.868

表 5-2-1 と図 5-2-22 から材料によるもり上り形状の特徴をまとめると、25S はもり上り高さが高く、もり上り幅が狭いが、56S では逆にもり上り高さが低く幅が広がっており、24S、電鍍銅はこれらの中間の形状となっている。このもり上り形状の特徴について井田<sup>25)</sup>らはこの実験に用いた Al 合金 3 種についての微小引っかけかたさの測定において、最も硬い 24S は横方向の変形が拘束されて高さ方向の変形が強調された「もり上り」形、中間の硬さの 25S は横方向の変形がかなり存在する「横流れ」形、最も軟かい 56S ではこの傾向がさらに大き

くもり上りのあまりみられない「くいこみ」形という分類を行なっている。さらにこの変形の異なる理由として、金属組織の点から材料に存在する介在物の大小と横方向への変形の拘束、したがってポアソン比の大小とが対応するためと考えている。

この分類を表 5-2-1 に適用してみると、24 S と 25 S が入れかわって、25 S は「もり上り」形、24 S は「横流れ」形となる。試料については井田らの使用したものと同一であるが、引っかかり方向が異なっている。56 S では粒状組織で引っかかり方向の影響を受けないが、24 S、25 S では井田らが平板状あるいは繊維状組織を引っかいているのに対し、筆者らはこれと直角な方向の板状あるいは棒状断面の組織を引っかいている(図 4-1-3 参照)。この組織はすでに 4-1-4 で述べたように、24 S よりも 25 S の方が細かく、これに対応して横方向の変形に対する拘束が 24 S よりも 25 S で大きくなるためであろうと考えられる。

## 6. 結 語

以上述べたように、弾性支持工具による引っかかり現象は、工具先端の挙動を決定する支持弾性体の動特性、振子の運動、引っかかり抵抗、またおもに引っかかり痕のもり上り形状を左右する材料の機械的性質、および組織、さらには微小切り込みにおける材料の変形機構など多くの難しい問題を含んでいる。

この報告では引っかかり痕の観察と引っかかり痕形状の立体的測定に重点をおき、これと弾性体の特性、あるいは材料の機械的性質ならびに組織との関係を吟味した。その結果を要約すれば次のようになる。

1) 試作した引っかかり実験装置の切り込み精度は表 4-5-1 に示したように、 $+0.034 \mu$  の定差をもち、信頼係数を 0.99 とした場合切り込みの誤差は  $-0.043 \sim +0.111 \mu$  の範囲にあり、この実験における切り込みに対しては十分に信頼できるものであることが分かった。

2) 弾性支持工具の挙動は、工具に働く力を適当な形に近似し、さらに弾性体の特性に対する動的考慮を行なうことによって定性的には説明することができた。

3) 工具を弾性体で支持することによって材料の変形機構そのものが大きく変ることではなく、いずれの場合にももり上りを生じ切りくずの生成はほとんど認められなかった。

4) 工具支持弾性体のバネ定数が小さくなると、引っかかり痕の喰い込み部と離脱部に観察される摩擦痕が長くなり、また縦断面形状は喰い込み部での傾斜が剛性支持の場合とあまり差がないのに対し、離脱部での傾斜はゆるやかとなり、全体としては円弧からはずれて舟底形に近づくことが分かった。

5) もり上り形状は材料によって異なり、その形状の違いは材料の機械的性質および組織の違いから説明できた。

6) 引っかかりにおける速度効果は、工具支持弾性体が柔かい場合に引っかかり痕形状、特に縦断面形状にその効果が認められた。

## 謝 辞

終りに本研究に着手する機会を与えられた元北大工学部教授中村常郎博士(現職業訓練大学校教授), ならびに日本電信電話公社電気通信研究所井田一郎博士に衷心より感謝の意を表す。また引っかけ痕形状測定にあたって測定器使用を快諾下さった, 道立工業試験所矢崎洋機械金属部長をはじめ精密測定室の方々に厚く感謝申し上げる。なお本報告の諸実験ならびに測定は, 北大精密工学科昭和38年度卒業生大竹伸雄(現小西六写真工業勤務), 同昭和39年度卒業生千田吉範, 守屋正(現精工舎, 三菱重工業勤務), 同昭和40年度卒業生神田哲夫の各氏のご協力によるものである。ここに記して謝意を表するしだいである。

## 文 献

- 1) 井上勝: 特殊といしPVAについて, 日本機械学会誌, 57巻421号(1954).
- 2) T. Horie: Grinding Performance of the PVA Wheel, Bulletin of JSGE, No. 1 (1961) 55.
- 3) 毛利・柏原: ビニールボンド砥石による黄銅の超仕上げについて, 超仕上げの研究第2報, 通研成果報告(1955).
- 4) 大越・倉藤・須田: 黄銅の電解研磨の研究(第1報), 電解電圧, 電解液の濃度温度の影響, 精密機械, 15巻11, 12号(1939), 237.
- 5) 筒井忠夫: 黄銅電解研磨面の耐蝕性, 精密機械, 22巻9号(1956), 377.
- 6) 佐藤敏一: 化学的加工法(第5報), 電気化学的溶液を利用するアルミニウムの加工, 精密機械, 27巻8号(1961), 532.
- 7) 南日朗: 微小孔の電解的加工に関する研究(第1報), 銅に対する微小孔の電解的加工実験, 精密機械, 27巻12号(1961), 781.
- 8) 小林昭: 研削機構に関する最近の研究状況 —その1単粒の切削作用について—, 精密機械, 25巻4号(1959), 95.
- 9) 佐藤健児: 研削理論, 精密機械, 27巻6号(1961), 323.
- 10) 岡村健二郎: 単粒研削, 精密機械, 27巻6号(1961), 333.
- 11) 佐藤健児: 日本における研削機構研究の進展, 精密機械, 32巻1号(1966), 9.
- 12) Louis A. Pipes: Applied Mathematics for Engineers and Physicists, McGraw-Hill, (1958), 670.
- 13) 谷下・渡辺訳: チェンエンロ工業振動学, 東京図書(1961).
- 14) 佐藤健児: 切削理論(I) 砥粒及び砥石による加工, 誠文堂新光社(1961), 51.
- 15) 大越・吉川・佐田: 単一砥粒の研削作用, 精密機械, 25巻6号(1959), 266.
- 16) 大越・吉川・佐田: 単粒研削におけるもり上りの速度効果, 精密機械, 25巻10号(1959), 524.
- 17) 佐々木・岡村: と粒の切削機構について, 日本機械学会論文集, 26巻163号(1960), 394.
- 18) 中川鶴太郎: レオロジー, 岩波全書(1961), 171.
- 19) 小野木重治: レオロジー要論, 棋書店(1963), 187.
- 20) 祖父江寛訳: フェリー高分子の粘弾性, 東京化学同人(1964), 108.
- 21) 谷口紀男: 硬脆材料の衝撃破砕加工法, 誠文堂新光社(1959), 78.
- 22) 本間・春日屋: 次元解析・最小2乗法と実験式, コロナ社(1960).
- 23) 田中・人見: 錐形工具による低速小切込み切削(第2報) 切削過程の実験的検討(その1), 精密機械, 28巻5号(1962), 268.
- 24) 中村・斎藤・五十嵐: 軟質金属材料の鏡面仕上げの研究(第2報), 通研経過資料, 第1524号(1964).
- 25) 井田・新井・鈴木: Al合金精密切削面の加工変質層, 通研実用化報告, 13巻9号(1964), 1380.