砥石表面の残留砥粒と切れ刃分布*

伊 藤 正 治** 酒 井 清 介*** 太 田 英 一**

Distribution of Cutting Edges and Grains Remaining on a Grinding Wheel Surface

Shoji Ito, Seisuke SAKAI, Eiichi Ota

In this paper, the topography for external surface of a grinding wheel after dressing is given by replica method, under the dressing feed $f_d=25\text{ }\mu\text{m/rev}$ and $f_d=250\text{ }\mu\text{m/rev}$. From this topography, the relation between dressing feed and distribution in depth of cutting edges formed on wheel surface by dressing operation is shown and the numbers of grains remaining on the surface after dressing operation are drawn. Otherwise, the numbers of grains existing on an ideal section of an actual wheel are calculated, and these results are compared with experimental results. The main results obtained are as follows:

- (1) Distribution in depth of cutting edges formed by dressing operation is normal distribution, and dressing feed influences the standard deviation and the shape of a wheel surface.
- (2) Abrasive grains remaining on a wheel surface after dressing operation are about 52% of all grains to exist on the surface, and dressing feed scarcely affects this value.

1. 緒 言

ビトリファイド砥石は体積にして40～50%の砥粒と20～40%の気孔を含むが、この値は必ずしも研削作業の遂行に適した値とは言えない。砥石の強度と適当な量のチップポケットおよび個々の切れ刃の切削性能はそれぞれ別個の問題であるが、現状では、目直し作業により砥石表面から砥粒の一部を破碎または脱落させ、これらの問題の解決が試みられている^{1),2)}。

砥石内の砥粒は目直し作用または砥石減耗によって順次砥石外周面上に位置して研削作業を行うが、一部の砥粒は目直し作業や研削作業中に脱落してチップポケット化し、研削作用を円滑に進行させる。すなわち、目直し作業は、砥石表面の砥粒を破碎または脱落させ、鋭利な切れ刃が分布する層を作ると同時にチップポケットを拡大し、砥石の研削性能を向上させる。したがって、目直し後の砥石表面に残る“研削に参与する砥粒”の数とその砥粒上に作られる切れ刃の3次元的な分布の実際を知ることが、より合理的な研削砥石の作製と最適目直し条件の確立にとって不可欠である。しかし、現在これらの定量的な測定結果^{3)～5)}を目直し条件との関係において求めた報告⁶⁾は少ない。

本報では目直し直後の3次元的な切れ刃分布を測定し、その分布の型を目直し速度との関係において考察す

ると同時に、砥石表面のトポグラフィより目直し後の砥石表面に残される砥粒数を求めた。また、砥石を任意理想断面で切断したときの切断面上に存在する砥粒数の計算結果と上記の測定結果について考察した。

2. 砥石表面の砥粒数

目直し作業による砥粒の破碎と脱落の割合を知るためには、砥粒の破碎と脱落が全くない場合の砥石表面の砥粒数、すなわち砥石の任意理想断面上の砥粒数と、目直し後の砥石表層部の正確なトポグラフィが必要である。しかし、従来の砥石表面の測定によって得られたものは切れ刃の数であり、この場合2個以上の切れ刃が同一砥粒上に存在している可能性がある。このため本報では砥石表面の切れ刃数と同時に切れ刃がそれより深い部分で連続する頻度を求め、これらより砥石表面に残される砥粒数を推測した。また、測定される切れ刃の一部は目直し作用を受けない、砥石外周面よりわずかに内部にある砥粒も含むため、その数についても考慮した。

2.1 任意断面上の砥粒数

一定径の球形砥粒で構成された砥石の任意切断面上の砥粒密度は竹中ら⁶⁾により示されたが、ここで粒径と形状が一定でない一般的な砥石の任意切断面上の砥粒数について考えてみる。図1に示すように、平行な2平面に内接する体積が v_s の空間Sは、その内部に全体積が v_g の砥粒Gを含むとする。Sを任意の位置で2平面に平行に切断し、Sの切断面積を a_s 、Gの切断面積の和を a_g とすれば、 a_s と a_g の平均値 $\bar{a}_s$ と $\bar{a}_g$ はそれぞれ次式で与えられる。

* 原稿受付 昭和49年6月3日。精機学会広島地方学術講演会（昭和48年11月21日）にて発表。

** 正 会 員 名古屋工業技術試験所（名古屋市北区平手町1丁目）

*** 名古屋工業技術試験所

図1 砥粒を含む空間Sを任意に切断したときの空間断面積 a_s と砥粒断面積 a_g の関係

$$\bar{a}_s = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} a_s dx = \frac{v_s}{x_2 - x_1}$$

$$\bar{a}_g = \frac{1}{x_2 - x_1} \int_{x_1}^{x_2} a_g dx = \frac{v_g}{x_2 - x_1}$$

したがって砥粒を含む空間を任意に切断した場合、切断面の砥粒面積率を A_g 、空間内の砥粒体積率を V_g とすれば

$$A_g = \frac{\bar{a}_g}{\bar{a}_s} = \frac{v_g}{v_s} = V_g \quad (1)$$

となり、面積率と体積率は等しくなる。ここで個々の砥粒をその体積によって j 階級に分け、それぞれの階級の代表値を v_i とする。次に砥石の任意切断面（面積を a ）を考え、この面で切断される体積が v_i の砥粒の数を N_{ia} 、個々の砥粒の切断面積を $a_{ik} (k=1, 2, \dots, N_{ia})$ 、これらの平均切断面積を $\bar{a}_i$ とすれば

$$\bar{a}_i = \frac{1}{N_{ia}} \sum_{k=1}^{N_{ia}} a_{ik} \quad (2)$$

で表される。指標 $i (i=1, 2, \dots, j)$ は体積が v_i の砥粒に対応することを示す。ここで、体積が v の砥石内に含まれる、体積が v_i の砥粒の数を N_{iv} とし、さらに

$$A_{gi} = \frac{\sum_{k=1}^{N_{ia}} a_{ik}}{\sum_{i=1}^j \left(\sum_{k=1}^{N_{ia}} a_{ik} \right)}, \quad V_{gi} = \frac{N_{iv} \cdot v_i}{\sum_{i=1}^j N_{iv} \cdot v_i}$$

とすれば

$$\frac{1}{a} \sum_{k=1}^{N_{ia}} a_{ik} = A_{gi} \cdot \frac{1}{a} \sum_{i=1}^j \left(\sum_{k=1}^{N_{ia}} a_{ik} \right) = A_{gi} \cdot A_g \quad (3)$$

$$\frac{N_{iv} \cdot v_i}{v} = V_{gi} \cdot \frac{1}{v} \sum_{i=1}^j N_{iv} \cdot v_i = V_{gi} \cdot V_g \quad (4)$$

となる。式(3)と式(4)の左辺は体積が v_i の砥粒に関する面積率と体積率を示す。したがって任意断面で切断さ

れる単位面積当たりの砥粒数 N は式(1)、式(2)、式(3)より

$$N = \sum_{i=1}^j \frac{N_{ia}}{a} = \sum_{i=1}^j \frac{V_{gi} \cdot V_g}{\bar{a}_i} \quad (5)$$

で与えられる。ここで個々の砥粒の形状を長径、短径およびそれらの比がそれぞれ a, b, ε の回転楕円体とみなせば、その平均切断面積 $\bar{a}_i$ は次式で表される。

$$\bar{a}_i = 2 \cdot \pi^2 \cdot a \cdot b \left(3 \cdot \int_0^\pi \sqrt{\frac{\tan^2 \theta + \varepsilon^2}{\tan^2 \theta + \varepsilon^4}} d\theta \right)$$

上式の計算結果は、同体積の球の平均切断面積 $\bar{a}_i = \pi d_i^2 / 6$ に対し、 $1 \leq \varepsilon \leq 2$ の範囲で $0.98 \sim 1.02$ となる。また砥石に含まれる砥粒をすべて同一径の球状と仮定すれば式(5)は竹中らによって示された式と一致する。

2.2 砥石減耗により研削作用面に加わる砥粒数

砥石内部において砥粒は3次元的にランダムに分布すると考えれば、砥石内の任意の切断面によって切断される砥粒の数は式(5)で与えられるが、個々の砥粒の切断位置は砥粒の中心からの距離に対して等確率となる。したがって、砥石内部にその間隔が δ_g の平行な2断面 S_1, S_2 を考えた場合、 S_2 によって切断される砥粒が S_1 によって切断されない確率 P_{δ_i} は

$$\bar{P}_{\delta_i} = \frac{\delta_g}{\bar{d}_i} \quad (6)$$

である。ここで $\bar{d}_i$ は砥粒の平均粒径であり、 P_{δ_i} は砥粒の方向により変化し、その平均値を $\bar{P}_{\delta_i}$ とした。式(6)は最初の砥石外周面 S_1 が半径で δ_g の砥石減耗によって S_2 に移ったとき、 S_2 面上に存在する砥粒のうち砥石減耗によってこの面上に新たに加わった砥粒の数 n が

$$n = \sum_{i=1}^j \frac{N_{ia}}{a} \cdot \bar{P}_{\delta_i} = \sum_{i=1}^j \frac{\delta_g \cdot V_{gi} \cdot V_g}{\bar{a}_i \cdot \bar{d}_i} \quad (7)$$

によって得られることを示している。なお式(7)の右辺の分母は砥粒体積 v_i を示す。

2.3 計算結果

砥石の任意断面で切断される砥粒数 N と砥石の減耗によって研削作用面上に新たに現れる砥粒数 n は式(5)および式(7)で求められる。砥粒形状については回転楕円体と球形の場合でその結果にほとんど差が認められないため砥粒は球形と仮定し、砥粒率 $V_g = 45\%$ の場合の粒度と N および n の関係を求め、図2に示す。 n は $\delta_g = 1 \mu\text{m}$ に対する値である。計算に当たって、粒度分布に関してはJISで定められた2個のふるい目の間の砥粒はその粒径として2個のふるい目の平均値を用いた。

この結果は砥石の理想断面上の砥粒数が同じ粒度の砥石であっても $\pm 20 \sim 30\%$ 変動するものであることを示

図2 任意の切断面上の砥粒数および砥石内部より新たに現れる砥粒数と粒度の関係

している。

3. 切れ刃分布の測定

従来、砥石表面の状態を測定するために多くの方法が用いられてきた⁷⁾が、本報では3次元的なトポグラフィを得るため図3に示すレプリカ法を用い、これより目直し直後の切れ刃分布の測定を行った。砥石はWA 60 Kを使用し、目直し工具として単石ダイヤモンド工具を用いた。目直し条件は、切込み量 $A_d=10\mu\text{m}$ 、送り速度 $f_d=25\mu\text{m/rev}$ および $f_d=250\mu\text{m/rev}$ とした。この送り速度はそれぞれ目直し後、前者の場合砥石表面がほぼ平坦となり、後者の場合砥石表面にねじみぞが作られる速度である。なお上記の目直しを行う前にこの砥石に含まれる砥粒の平均粒径に相当する $280\mu\text{m}$ を、別のドレッサによって $A_d=50\mu\text{m}\times 5$ 回および前記のドレッサによって $f_d=25\mu\text{m/rev}$ 、 $A_d=10\mu\text{m}\times 3$ 回の目直しを行って除去した。

砥石表層部の切れ刃の正確な圧痕を得るため、転写面としてガラスベース(C)上に接着した厚さ $34\mu\text{m}$ の電子顕微鏡用アセチルセルロースフィルム(B)を使用した。このフィルムをメチルアセテート蒸気のふん囲気中で軟化させ、研削方向のみに動く台車(D)上に設置し、これに前記の目直しした砥石(A)を圧着して研削方向に回転させ、砥石外周面の切れ刃の圧痕を得た。次に表面測定機を用いてこのフィルム面を $20\mu\text{m}$ 間隔で走査し、砥石表層部のトポグラフィを得た。測定範囲は幅 1.6mm 、長さ 20mm 、倍率は縦倍率 1000 倍、横倍率 10 倍とした。

図4は1回の走査によって得られる圧痕のプロファイルの例であり、これより図5に示す砥石表面のトポグラフィ

A: 砥石, B: アセチルセルロースフィルム, C: ガラスベース, D: 台車, E: 押付圧測定台

図3 レプリカ法による切れ刃分布の測定

図4 アセチルセルロースフィルムに取った切れ刃の圧痕のプロファイル

図5 砥石表面のトポグラフィ

ィが得られる。同図は $f_d=250\mu\text{m/rev}$ のときの図であり、深さ $4\sim 5\mu\text{m}$ のねじみぞが認められる。

このようにして測定された個々の切れ刃の3次元的な位置は、その切れ刃の先端の位置によって表し、1個の砥粒上に2個以上の突起部が存在し、それが $1\mu\text{m}$ 以上の高さを持ってばすべて独立した切れ刃と見なした。したがって、2個以上の切れ刃がそれより深い部分で連続する可能性があり、これが従来測定されてきた切れ刃と同じく、測定深さによって切れ刃数が変化する原因となる。このため、2個以上の切れ刃が連続する深さと頻度を一体化頻度として測定し、その深さに対する頻度分布を求め、これと切れ刃分布より砥石表面の砥粒数を推定した。

図6 切れ刃深さと一体化数の分布

4. 測定結果および考察

4.1 切れ刃深さの分布

図6の実線は目直し直後の砥石表面上に作られた切れ刃先端の深さとその頻度を示し、深さ δ における値は深さ $(\delta-1) \sim \delta$ (μm)の範囲の切れ刃数 N を示す。同時に2個以上の切れ刃の一体化頻度の分布を点線で示した。

$f_d = 25 \mu\text{m}/\text{rev}$ の場合、切れ刃深さの分布は $0 \leq \delta < 7 \mu\text{m}$ の範囲で正規分布に近い型を示し、 $\delta \geq 7 \mu\text{m}$ で $N = 10 \sim 15$ 個/ $\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}$ の値となる。前述の方法によって測定される切れ刃のうち砥石外周面よりわずかに内部にあって目直し作用を受けない砥粒の数は式(7)から $\bar{n} = 5$ 個/ $\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}$ であるから、目直し作用によって $\delta \geq 7 \mu\text{m}$ の深さに作られる切れ刃の数は約 $5 \sim 10$ 個/ $\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}$ となり、これらの切れ刃を上記の $0 \leq \delta < 7 \mu\text{m}$ の範囲の切れ刃分布の延長と考えることは不自然である。したがって、このような砥石表面の切れ刃分布の型について考えてみる。

目直し条件が $f_d = 25 \mu\text{m}/\text{rev}$ のとき、ドレッサによって砥石表面に作られるねじみぞの深さは $0.1 \mu\text{m}$ 以下で、ほぼ完全な円筒面が作られる。このときドレッサの砥粒に対する最大切込み深さはドレッサ先端を球形と仮定して $3.6 \mu\text{m}$ であり、これによって砥粒は表面的または全体的に破碎されるか脱落する。個々の砥粒が実際にどのような破碎を起こすかはその砥粒のおかれた状態がそれぞれ異なるため一定ではないが、その結果生じる現象は大きな違いがある。砥粒の表面的な破碎はドレッサによる切削または表面的な数 μm 程度の粉碎である⁸⁾のに対し、全体的な破碎は砥石の製造過程で作られる諸欠陥等に起因する大破碎と考えられる。したがって測定される切れ刃はその生因によって次の3種類に分類できる。

- (1) 砥粒の表面的な小破碎によって作られる切れ刃。
- (2) 砥粒の欠陥に起因する大破碎により作られる切れ刃。

図7 切れ刃の深さ分布の実測値と計算値

(3) 目直し作用を受けていない砥粒。

深さ $7 \mu\text{m}$ までの大部分の切れ刃は(1)に属し、これより深い部分の切れ刃の多くは(2)に属すると思われる。

破碎された砥粒の粒度分布が基本的に対数正規分布に従うとすれば、(2)の切れ刃の深さ $10 \mu\text{m}$ 前後での約 10 個/ $\text{cm}^2 \cdot \mu\text{m}$ の値は漸減しながら砥石外周面まで続くと思われる。ここで(2)の分布が $0 \leq \delta \leq 10 \mu\text{m}$ の範囲で直線的に増加すると仮定し、(1)の分布の型について、平均深さ $\delta_m = 3.6 \mu\text{m}$ 、標準偏差 $\sigma = 1.02 \mu\text{m}$ の正規分布をなすとの仮説をたてれば、これは危険率を5%として棄却されない。

目直し条件が $f_d = 250 \mu\text{m}/\text{rev}$ の場合にはドレッサの砥粒に対する切込み深さは最大 $10 \mu\text{m}$ で、これによって砥石表面には図5に示すような深さ $4 \sim 5 \mu\text{m}$ のねじみぞが形成される。また、この場合も前者と同様に測定される切れ刃は3種類に分類されると思われる。砥石表面がドレッサによってこのような形に成形され、全体の大部分を占める(1)に属する切れ刃の砥石面からの深さが、前者と同様にほぼ正規分布に従うとすれば、ねじみぞの形と標準偏差 σ を変数として、全切れ刃の円筒外周面からの深さ分布を求めることができる。図7は前記の(2)と(3)に属する切れ刃を含めて算出した切れ刃深さの分布と測定結果($\circ$ 印)をプロットしたものである。図中の(B)に示す形状に砥石表面が成形され、その砥石面下に $\sigma = 1.2 \mu\text{m}$ の正規分布に従って切れ刃が分布すると仮定した場合、測定結果と計算結果は非常によく一致する。

以上の結果は目直し作業によって砥石表面に作られる切れ刃が、その生因によって3種類に分類され、全体の90%を占める $10 \mu\text{m}$ 以下の小破碎によって作られる切れ刃の深さは、目直し速度とは無関係にほぼ正規分布に従い、 σ と砥石表面の形状の違いが図6に見られる切れ刃分布の違いの原因となることを示している。

図8 累積切れ刃数と累積一体化数

4.2 目直し後に残る砥粒数

図8は累積切れ刃数 N_δ と累積一体化数 ν_δ を示し、同時に砥石を深さ δ (μm)で砥石外周面に平行に切断したとき、この面で切断される切れ刃数 N_0 を示す。ここで $N_0 = N_\delta - \nu_\delta$ である。これらの切れ刃の中には結合剤切れ刃も含まれるが、これと砥粒切れ刃の判別は非常に困難なためここではその区別は行わなかった。

図8において目直し速度が $f_d = 25 \mu\text{m}/\text{rev}$ のとき、 $\delta = 10 \mu\text{m}$ での N_0 の値は約600 個/ cm^2 である。しかし、図6の一体化頻度の分布を外挿して、 $10 < \delta \leq 20 \mu\text{m}$ の範囲で約50 個/ cm^2 の切れ刃が一体化するとみなせば、目直し作業後の砥石表面に残る砥粒数は約550 個/ cm^2 となる。また同図の切れ刃数 N の分布を、この範囲の切れ刃が前項で述べた(2)と(3)に属し、ほぼ一定またはわずかに漸増することを考慮して外挿すれば、約150 個/ cm^2 の切れ刃がこの範囲に存在すると思われる。このうち、図2から50 個/ cm^2 の切れ刃は(3)に属するから、目直し作業によってこの深さに作られる切れ刃は約100 個/ cm^2 となる。目直しによる砥粒の破碎によって $\delta > 20 \mu\text{m}$ の範囲にも切れ刃が作られると思われるが、これらの切れ刃はその深さのために有効切れ刃となる可能性が非常に低く、かつその数も少ない。また本報で用いた測定法ではそれらの数と分布を正しく把握することができないため、これらは脱落砥粒に属するとして扱った。

以上の結果と図2の値を比較して図9に示す。砥石表面上の砥粒数は脱落がなければ式(5)から得られる図2の値を示すはずである。しかし実際の砥石表面上から測定される切れ刃数に切れ刃の一体化を考慮して求めた残留砥粒数は計算値の約52%に相当する。また、このうち深さ10~20 μm の範囲に切れ刃を作る砥粒は約8%

理論値

$N = 1250 \text{ 個}/\text{cm}^2$ (粒度#60, 砥粒率 $V_g = 45\%$)

測定値 砥石: WA60K, $V_g = 45\%$

(I) $f_d = 25 \mu\text{m}/\text{rev}$

$N_\delta (\delta = 10 \mu\text{m}) = 1180 \text{ 個}/\text{cm}^2$	
$N_0 (\delta = 10 \mu\text{m}) = 600 \text{ 個}/\text{cm}^2$	
$\nu_\delta (\delta = 10 \mu\text{m}) = 580 \text{ 個}/\text{cm}^2$	
550 個/ cm^2	50 ← $\nu_\delta (10 < \delta \leq 20 \mu\text{m})$
	150 ← $N_\delta (10 < \delta \leq 20 \mu\text{m})$
	50 ← $n (\delta_g = 10 \mu\text{m})$
44% 残留砥粒	8% 脱落砥粒

(II) $f_d = 250 \mu\text{m}/\text{rev}$

$N_\delta (\delta = 10 \mu\text{m}) = 1350 \text{ 個}/\text{cm}^2$	
$N_0 (\delta = 10 \mu\text{m}) = 750 \text{ 個}/\text{cm}^2$	
$\nu_\delta (\delta = 10 \mu\text{m}) = 600 \text{ 個}/\text{cm}^2$	
550 個/ cm^2	200 ← $\nu_\delta (10 < \delta \leq 20 \mu\text{m})$
	150 ← $N_\delta (10 < \delta \leq 20 \mu\text{m})$
	50 ← $n (\delta_g = 10 \mu\text{m})$
44% 残留砥粒	8% 脱落砥粒

図9 目直し後の砥石表面の残留砥粒と脱落砥粒の割合

で、残り48%の砥粒が目直し作業によって脱落するかまたは非常に大きく破碎され则认为される。

目直し速度が $f_d = 250 \mu\text{m}/\text{rev}$ のときも同じ方法によって砥石表面に残される砥粒数を求め、その結果を同じく図9に示した。この場合、深さ10 μm までに作られる切れ刃数は前者に比べて約15%多いが、切れ刃の一体化を考慮して求めた残留砥粒数は約52%となる。またこのうち深さ10~20 μm に作られる切れ刃の数も約100 個/ cm^2 と前者とほぼ同じ値を示す。

目直し条件によって同一砥石が異なった研削性能を示すことは従来広く利用されてきた事実であるが、本報で得られた結果はその主な原因が目直し作業によって脱落する砥粒数の違いによるものではなく、砥石外周面の形状と切れ刃分布の違いにあることを示している。

5. 結 論

目直し直後の砥石表面のトポグラフィをレプリカ法によって求め、目直し作業によって砥石表層部に作られる切れ刃の深さ分布と目直し速度の関係、および目直しによって砥石表面から脱落する砥粒の数について考察した。その結果次の点が明らかとなった。

- (1) 砥石の任意断面上の砥粒数の理論値は同一粒度の砥石においても $\pm 20 \sim 30\%$ 変動する可能性があり、WA 60 Kの砥石の場合、目直し直後の砥石表面の切れ刃数はほぼこの値と一致する。しかし、切れ刃が同一砥粒上に2個以上作られている可能性があることを考慮し、さらに切れ刃先端の深さが20 μm 以上で事実上研削作業に関与しないと思われるものを

脱落砥粒と同一視して求めた砥石表面の残留砥粒数は、上記の理論値の平均値に対して約 52% となる。

- (2) 研削作用に参与する砥石表面の切れ刃はその大部分が深さ $10\ \mu\text{m}$ までに分布するが、これらの切れ刃はその生成過程によって 3 種類に分類される。このうち目直し工具による、砥粒の小破碎によって作られる切れ刃はこの範囲内に存在する切れ刃の 90% を占め、その深さ分布はほぼ正規分布を示す。
- (3) 目直し速度は砥石外周面の形状と外周面上に作られる切れ刃数および正規分布をなす切れ刃の深さ分布の標準偏差に影響を与える。しかし、目直し後の砥石表面に残留する砥粒と、目直し作業によって、以後の研削作業に参与しない程度に破碎されるかまたは脱落する砥粒の割合にはほとんど影響を与えない。

文 献

- 1) 津和秀夫, 田部 信, 安井平司: 研削砥石の性能向上に関する研究 (第 1 報), 精密機械, **36**, 11 (1970) 739.
- 2) 安井平司, 中園 汎, 津和秀夫: 振動目直しに関する研究 (第 1 報), 精密機械, **39**, 10 (1973) 1030.
- 3) 織岡貞次郎: 確率論を応用した研削仕上面創成の理論, 日本機械学会誌, **63**, 499 (1960) 1185.
- 4) 松井正己, 庄司克雄: 研削砥石の有効切れ刃に関する研究, 精密機械, **34**, 11 (1968) 743.
- 5) 中山一雄: 研削砥石の切れ刃分布, 昭和 42 年度精機学会秋季大会学術講演会前刷 (1967) 107.
- 6) 竹中規雄, 笹谷重康: 研削作用に関する研究 (第 2 報), 日本機械学会論文集, **26**, 163 (1960) 403.
- 7) 松井正己, 庄司克雄: 統計的手法による研削機構の考察 (第 1 報), 精密機械, **36**, 2 (1970) 115.
- 8) 田中義信, 津和秀夫, 河村末久: 研削砥石の目直し切れ刃に関する研究, 精密機械, **30**, 10 (1964) 809.