

## 研削仕上面あらさに及ぼす砥石減耗の影響

著者	本多 良辰, 進村 武男, 高沢 孝哉
雑誌名	金沢大学工学部紀要 = Memoirs of the Faculty of Technology Kanazawa University
巻号	8
ページ	1
発行年	93-103
発行年	1974-03-25
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2297/25223">http://hdl.handle.net/2297/25223</a>

# 研削仕上面あらさに及ぼす砥石減耗の影響

本多良辰\* 進村武男\*\* 高沢孝哉\*\*\*

**Effect of Wheel Wear on Ground Surface Roughness**

by

Ryōshin HONDA, Takeo SHINMURA and Kōya TAKAZAWA

## Abstract

In this paper, changes in the surface roughness of a workpiece, that probably happen due to the wheel wear during the grinding process, are analytically dug out by comparing with some experimental results.

From the continuous observation of the wheel and the work surface it is found that the ground surface becomes coarser with the wheel wear, and at the same time that the distribution of the grain cutting edges on the wheel changes.

A formula of the ground surface roughness is derived from the analysis of the grinding mechanism on the assumption that each cutting edge is shaped in conical frustum, as verified in the above observation, herewith the actual variations in the width of the wear land on the cutting edge and in the distribution of the cutting edges during the grinding process being taken into consideration. As a final consequence it is confirmed that the typical tendency of the roughness calculated from the formula closely agrees with the experiment.

The extent of roughness of the work surface seems to be restrained by the dulling of the cutting edges.

## 1. 緒 言

研削仕上においては砥石をドレッシング後相当時間研削が継続されるのが普通である。この場合、研削の進行につれて工作物の仕上面が次第に変化していくことはよく知られているところである。これは研削中砥石が減耗し、そのため砥石面の砥粒切れ刃の形状および分布状態が変化して、研削仕上面あらさの形成に影響するためと考えられる。

研削仕上面あらさに関しては、最近にいたり、砥石面の砥粒切れ刃の三次元的分布を考慮した砥石モデルによる解析的研究<sup>1)2)3)4)</sup>が行なわれ、この面での研削理論の進歩はかなり顕著である。しかし、従来の研究においては、砥粒切れ刃は円錐形状をなしかつ特定の分布形をとるものとして解析され、研削中砥粒切れ刃の状態が変化する事象にはあまり考慮が払われていない。したがって、上述の研削作業の実状に照らして、この観点から研削仕上面あらさの問題を実験的および解析的に検討する必

\* 精密工学科, \*\* 宇都宮大学工学部, \*\*\* 東京芝浦電気株式会社生産技術研究所

要があるように思われる。そこで筆者らは、研削過程における砥石面の砥粒切れ刃の状況および工作物の仕上面あらさの変化を詳細に観察し、砥粒切れ刃先端の摩耗および切れ刃分布状態が変化する事象を考慮して研削仕上面の創成機構を解析し、研削仕上面あらさの理論式を導いた。ついで、研削仕上面あらさと砥石の減耗現象との関係について検討を行なった。

### 2. 実験方法

平面研削盤を使用し、表1に示す実験条件で研削を行なった。砥石をドレッシングした後研削を続け、ある回数研削するごとに工作物の仕上面あらさ、砥石の半径減耗量を測定し、また、触針式切れ刃測定器で砥石面の砥粒切れ刃プロフィールを記録した。ここで1回の研削距離は75mm(試片長さ)である。

触針式切れ刃測定器にはエッジ幅が0.3~0.5mmのナイフエッジ形の触針が取付けられる。そして砥石を0.31mm/secで回転させ、砥石軸方向には触針エッジ幅に等しく、円周方向には20mmの範囲の砥石面内の切れ刃が測定される。このような操作を砥石円周上の3個所で行ない、図4のような切れ刃プロフィールを得る。これらの切れ刃プロフィールより切れ刃形状および砥石半径方向の砥粒切れ刃分布を観測した。切れ刃プロフィールの観測に際しては、とび抜けて高い切れ刃があるような場合はこれを除外して、もっとも高い切れ刃先端付近で砥石最外周面を決定し、これを基準面として砥石半径方向深さにおける砥粒切れ刃の先端を計数した。切れ刃計数にあたり、切れ刃プロフィールの突出したもの(実際的には0.5μm程度以上の突出)はすべて切れ刃とみなした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 研削仕上面あらさおよび砥石の減耗

研削過程における研削仕上面のあらさを観察すれば、図1に示すように、A60KmV砥石による仕上面のあらさプロフィールは研削初期にはかなり鋭利な条痕形状を示しているが、研削が進行するにつれて鈍化する傾向がみられ、C60MmV砥石による仕上面は研削の初期から鈍化した状態がみられる。これらのあらさプロフィールより中心線平均あらさ  $R_a$  および最大高さあらさ  $R_{max}$  を測定した、研削回数について図示すれば図2のようになり、仕上面あらさは研削が進むにつれて次第に大きくなる傾向がみられる。

表1 実験条件

研削盤	平面研削盤
砥石	A60KmV, 1号, 140×9.5×25.4 C60MmV, 1号, 149×9.5×25.4
工作物	S 55C, HRc 53 寸法 75 mm
ドレッシング	単石ダイヤモンド・ドレッサー 切込み 0.005 mm 送り速度 0.08mm/rev
研削	砥石周速度 約 1400m/min 工作物速度 約 5.7m/min 砥石切込み 0.005mm 乾式研削 クロスフィード無し

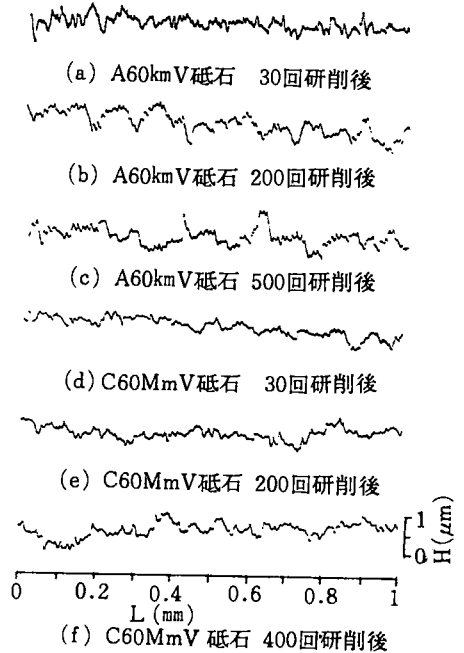


図1 研削仕上面のあらさプロフィール

次に、研削過程における砥石の半径減耗量を測定した結果を図3に示す。A60KmV、C60MmV砥石とも30回研削付近から定常減耗の状態に移っているが、C60M砥石はA60K砥石に比べて減耗が激しい。この場合の30回および200回研削時における砥石面の砥粒切れ刃プロフィールの例を図4に示す。これらのプロフィールより、研削初期には切れ刃はかなり鋭利な形状のものが多く、研削が進むにつれて切れ刃先端が摩耗して平坦化していく傾向がうかがわれ、また、表層部の切れ刃数が減少していく傾向がみられる。

このように、砥石が減耗するにつれて砥石面の切れ刃の状況も次第に変化し、そのため研削仕上面のあらしも変化していくものとみられる。そこで、次節において砥石面の砥粒切れ刃の状態を調べてみよう。

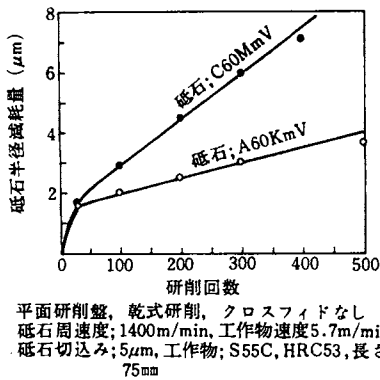


図3 研削の進行による砥石の減耗

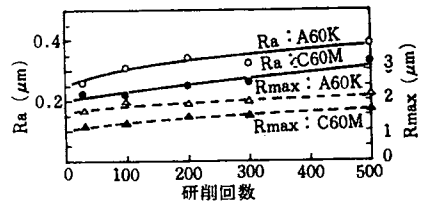
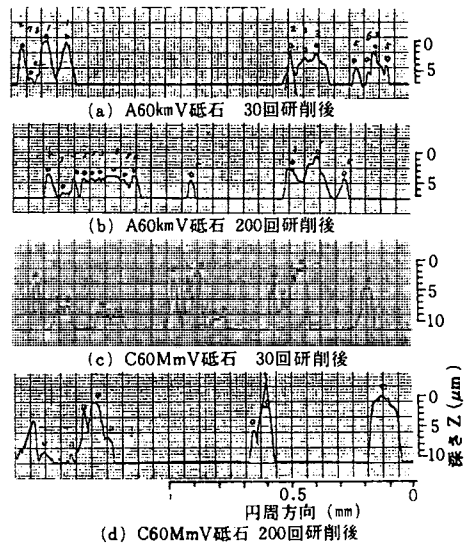


図2 研削の進行による仕上面あらしの変化



図中の○印は切れ刃を示し、数字は深さを示す。  
 触針エッジ幅0.3~0.5mm

図4 砥石面の砥粒切れ刃プロフィール

### 3.2 砥粒切れ刃の形状

砥粒切れ刃の形状は図4の切れ刃プロフィールからもわかるように複雑多様であるが、研削機構を理論的に解析するためには切れ刃形状をモデル化する必要があり、従来から円錐形、角錐形、球形などの切れ刃モデルが考えられてきた。切れ刃プロフィールを観察すれば、概括的には切れ刃は三角形から台形状に変化する傾向がみられる。ゆえに、砥粒切れ刃を円錐台形とみなすのが妥当なように思われる。そこで、砥粒切れ刃を頂角が $2\phi$ で先端が幅 $2b$ なる円錐台形と仮定し、前述の切れ刃プロフィールについて切れ刃頂角および先端幅を測定した。

研削に関与する砥石部分は砥石表層数 $\mu\text{m}$ の深さ範

表2 研削の進行による砥粒切れ刃頂角の変化

A60KmV 砥石		C60MmV 砥石	
研削回数	$2\phi$ (度)	研削回数	$2\phi$ (度)
30	161	30	158
200	162	200	162
500	159	400	164

困と考えられるので、いま便宜的に深さ  $5\mu\text{m}$  の砥石表面層に存在する切れ刃について、無作為抽出で百数十個を選び切れ刃頂角を測定してその分布を調べた。それらの数例を図5に示す。切れ刃頂角は  $120^\circ$  から  $180^\circ$  にわたって分布しており、最ひん値は  $160^\circ \sim 170^\circ$  付近にみられる。頂角の平均値  $2\bar{\phi}$  を求め研削の進行によりどのように変るかを調べたのが表2である。研削の進行により幾らかの変化はみられるが、必ずしも一定の変化傾向を示すとはいえず、一般的には平均切れ刃頂角  $2\bar{\phi}$  は  $160^\circ$  程度とみなしてもよいと考えられる。

次に、切れ刃先端幅  $2b$  を砥石表面層の数  $\mu\text{m}$  の深さ範囲について測定し、深さ  $1\mu\text{m}$  区間ごとの平均値  $\bar{b}_i$  (平均半幅) を求めて、深さによる  $\bar{b}_i$  の変化状況を調べた。それらの数例を図6に示す。両砥石とも研削初期には  $\bar{b}_i$  は砥石の半径方向深さ  $z$  に関して一様に近い状態を示しているが、研削が進むにつれて切れ刃先端の平たん化が進行し、深さ  $5\mu\text{m}$  程度の表面層範囲では  $\bar{b}_i$  は深さに関係して変化する様相を呈する。A60K砥石では表面から内部に向うにつれて  $\bar{b}_i$  は増大し  $5\mu\text{m}$  付近を過ぎると減小するようになる。一方、C60M砥石では表面で  $\bar{b}_i$  が大きく内部へ向うにつれて減小する状況がみられる。この現象は砥粒の摩耗特性、破碎特性および切れ刃先端幅が相互の切れ刃の研削関与度と与える影響などによって生じたと考えられるが、この問題についてはさらに広範な実験と砥粒の物性論的検討が必要と思われる。

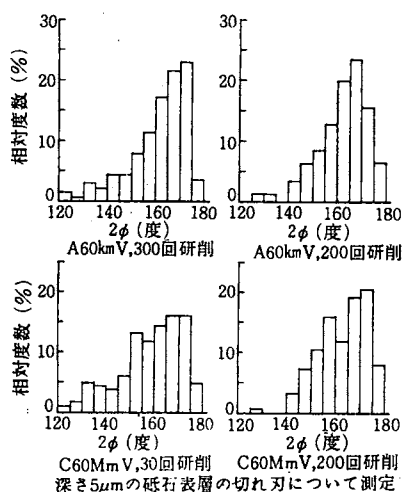
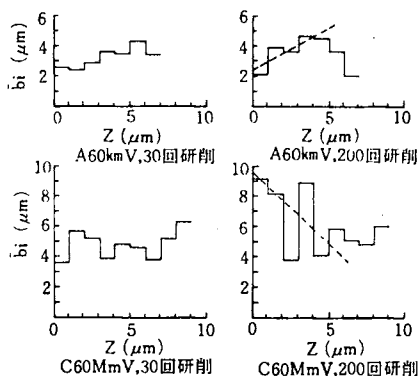


図5 砥粒切れ刃頂角の分布



$z$  : 砥石半径方向深さ

$\bar{b}_i$  :  $1\mu\text{m}$ 深さ区間の切れ刃先端半幅の平均値

図6 砥粒切れ刃先端幅の砥石深さによる変化

さて、切れ刃先端幅が砥石内部に入るにつれて変化する状況を、図6において破線で表わしたように、近似的に切れ刃先端半幅  $b$  が砥石半径方向深さ  $z$  に比例して変化するとみなすことができ、次式のように表わされる。

$$b = b_0 + mz \tag{1}$$

ここで、 $b_0$  は砥石表面における切れ刃先端半幅、 $m$  は比例定数で砥石内部に向うにつれて  $b$  が増大する場合は正の値、減小する場合は負の値を取るものとする。

研削仕上面あらさの形成に關する砥粒切れ刃は砥石のごく表層部のものに限られると考えてよく、いま便宜的に砥石表層  $3\mu\text{m}$  の深さ範圍の切れ刃について平均切れ刃先端半幅  $\bar{b}$  を求めて、研削回数について図示すれば図7のようである。 $\bar{b}$  の値は研削が進むにつれて増大し、また、A60K 砥石に比べてC60M砥石は大きな値を示している。

3.3 砥粒切れ刃の分布

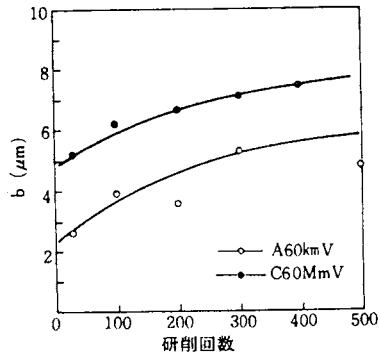
砥石面の砥粒切れ刃の分布については、切れ刃の平面的分布と砥石半径方向の分布を合せた三次元的分布について考慮しなければならない。これまでの研究<sup>5)6)</sup>によって切れ刃の平面的分布はほぼポアソン分布に従うことが確められており、したがって砥石半径方向の切れ刃分布がわかれば三次元的切れ刃分布の状態が定まる。ゆえに、ここでは砥石半径方向の切れ刃分布について扱う。

砥石面の切れ刃プロフィールより、単位砥石面積当り累積平均切れ刃数<sup>5)</sup>  $\bar{n}$  (個/ $\text{mm}^2$ ) を求め、砥石半径方向深さ  $z$  との關係を図示すれば図8のようになり、 $\bar{n}$  は深さ数  $\mu\text{m}$  の範圍では近似的に  $z$  のべき乗に比例するとみなすことができ、砥石半径方向切れ刃分布は次式で表わされる。

$$\bar{n} = k_s z^c \times 10^{3c} \tag{2}$$

ここで、 $k_s$  (個/ $\text{mm}^2 \cdot \mu\text{m}^c$ ) は切れ刃数に關係する定数で、 $z=1\mu\text{m}$  における  $\bar{n}$  の値であり、 $c$  は切れ刃分布形に關係する定数で、図8の直線の勾配である。

前述したように砥石が減耗すれば砥粒切れ刃の分布状態も変化すると考えられる。そこで、上式のパラメータ  $c$ 、 $k_s$  を図8のようにして実測し、研削過程における変化の状態を調べた結果は図9のよ



$\bar{b}$  : 深さ  $3\mu\text{m}$  の砥石表層の砥粒切れ刃の平均先端半幅

図7 研削の進行による砥粒切れ刃先端幅の変化

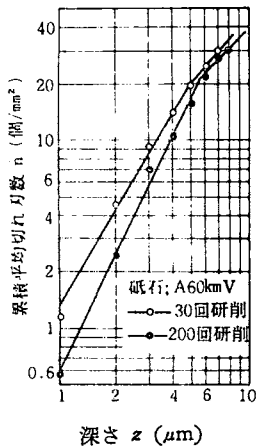
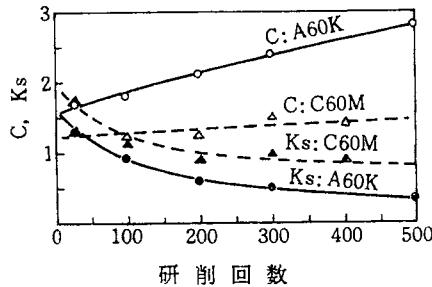


図8 砥石半径方向の砥粒切れ刃分布



$c$  : 切れ刃分布形に關係する定数  
 $k_s$  : 切れ刃数に關係する定数

図9 研削の進行による砥石半径方向切れ刃分布の変化

うである。本実験においては、研削の進行につれて  $c$  は上昇し、 $k_s$  は下降する傾向が示される。この結果は研削が進むにつれて表層部の切れ刃密度は次第に減少することを示している。

#### 4. 研削仕上面あらさについての理論的考察

##### 4.1 研削仕上面あらさ創成機構

ここでは研削仕上面あらさの創成機構を幾何学的に解析する。したがって砥石面の砥粒切れ刃の形状がそのまま仕上面に写されるものと仮定して解析を進める。

前述の実場的検討の結果に基づき、砥粒切れ刃は頂角が  $2\phi$  で先端幅が  $2b$  なる円錐台形とし、平面的な切れ刃位置はその中心軸によって定まり、かつ、切れ刃先端幅は砥石半径方向深さ  $z$  に比例して変化し(1)式で与えられると仮定する。また、砥石面の砥粒切れ刃は平面的にはポアソン分布し、砥石半径方向には深さ  $z$  に関してべき関数分布し(2)式で与えられると仮定する。

このような砥石モデルによる研削の幾何学を松井、庄司の解析方法<sup>4)</sup>により円筒プランジ研削について示せば図10のようである。(a)図において、A点を基準にして砥石中に円周方向に  $x$  軸、砥石軸方向に  $y$  軸、半径方向に  $z$  軸と座標軸をとれば、砥石中の砥粒切れ刃の座標は  $P(x, y, z)$  で表わされる。いま、工作物の研削方向に垂直な任意の断面  $O'B'$  のあらさプロフィールが(b)図のようであるとする。このあらさプロフィールにおいて高さが  $H$  の山  $E'B'F'$  ができるためには、頂角が  $2\phi$  で上底が  $2b$  なる台形  $EGIF$  の部分を切れ刃が通らないことが必要である。この  $EGIF$  の台形部分の研削に関与する砥石部分は  $CADBGEFI$  なる三日月状立体  $U$  であり、(c)図はこの立体の円筒面を平面に展開した図形である。立体  $U$  は次式によって与えられる。

$$y = \pm \{ b + (H - K_G^2 x^2 - z) \tan \phi \} \tag{3}$$

$x$  および  $z$  は次式の範囲の値をとる。

$$-K_G^{-1} \sqrt{H-z} \leq x \leq K_G^{-1} \sqrt{H-z}, \quad 0 < z \leq H.$$

ここで、 $K_G = \sqrt{(1/D_W)^2 + (1/D_S)^2} \cdot (v/V)$  であり、 $D_S$  および  $D_W$  はそれぞれ砥石および工作物の直径、 $V$  および  $v$  は砥石および工作物の周速度である。

したがって立体  $U$  内の平均砥粒切れ刃数(切れ刃数の期待値)  $\bar{N}$  は(1), (2), (3), 式より次のように計算される。

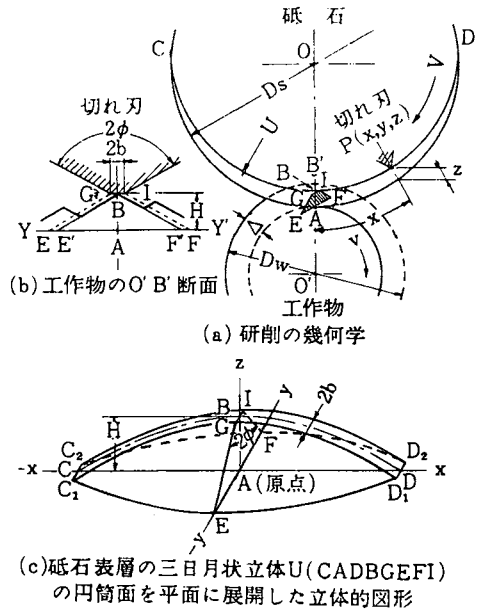


図10 研削仕上面あらさ創成機構

$$\begin{aligned} \bar{N} &= 4 \int_0^x \int_0^{K_0^{-1} \sqrt{H-z}} \frac{d\bar{n}}{dz} y \, dx dz \\ &= 4c(10^{3c})k_s \int_0^{x=K_0^{-1} \sqrt{H-z}} \int_0^z z^{c-1} \{b_0 + mz + (H - K_0^2 x^2 - z) \tan \phi\} dx dz \\ &= K_a (H^{c+1.5} + K_0 H^{c+0.5}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、

$$K_a = \frac{2\sqrt{\pi}\Gamma(c+1)}{\Gamma(c+2.5)} (10^{3c})k_s \left( \frac{1}{D_w} + \frac{1}{D_s} \right)^{-1/2} \frac{V}{v} (\tan \phi + cm), \quad K_0 = \frac{\Gamma(c+2.5)}{\Gamma(c+1.5)} \cdot \frac{b_0}{\tan \phi + cm} \quad (5)$$

本砥石モデルでは既報<sup>5)</sup>において考察したように、立体  $U$  内の切れ刃数の分布は  $\bar{N}$  をパラメータとするポアソン分布とみなすことができる。ゆえに、立体  $U$  内に切れ刃が一個も存在しない確率を求めれば、次式が得られ、これは切れ刃プロフィールにおいて高さが  $H$  と等しいかそれ以上の山ができる確率を表し、高さ  $H$  を確率変数とする分布関数であり、研削仕上面のアボットの負荷曲線を表わす。

$$F(H) = \exp\{-K_a(H^{c+1.5} + K_0 H^{c+0.5})\} \quad (6)$$

#### 4.2 研削仕上面あらさの式

仕上面あらさにおける高さ  $H$  の確率密度関数  $f(H)$  は(6)式を微分して得られる。

$$f(H) = -\frac{dF(H)}{dH} \quad (7)$$

したがって、研削仕上面あらさの中心線高さ  $\bar{H}$  は次式で与えられる。

$$\bar{H} = \int_0^\infty H f(H) dH = K_H \Gamma\left(\frac{c+2.5}{c+1.5}\right) K_a^{-\frac{1}{c+1.5}} \quad (8)$$

ここで  $K_H$  は次式で表わされる無限級数である。

$$K_H = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{(-1)^n}{n!} \cdot \Gamma\left\{\frac{(n+1)(c+0.5)+2}{c+1.5}\right\} + \frac{(-1)^{n-1}}{(n-1)!} \cdot \left(\frac{c+0.5}{c+1.5}\right) \cdot \Gamma\left\{\frac{n(c+0.5)+1}{c+1.5}\right\} \cdot \left\{\Gamma\left(\frac{c+2.5}{c+1.5}\right)\right\}^{-1} K_a^n \right] \quad (9)$$

ここで、

$$K_d = K_a^{\frac{1}{c+1.5}} K_0 = \frac{\Gamma(c+2.5)}{\Gamma(c+1.5)} \cdot \frac{b_0}{\tan \phi + cm} \cdot K_a^{\frac{1}{c+1.5}} \quad (10)$$

(9)式の計算は容易でないで、これに代る近似計算式を求める。まず、 $c$ 、 $K_d$  をパラメータとして(9)式より  $K_H$  を計算し、 $c$ 、 $K_d$ 、 $K_H$  間の関係を検討すれば、図11(a)に示すように両対数グラフ上で  $\log_e(1+K_H)$  と  $(e^{1-K_H}-1)$  とは実際の範囲では近似的に比例するとみなすことができ、 $K_H$  は近似的に次式で表わされる。

$$K_H = 1 - \log_e [1 + \beta \{\log_e(1+K_d)\}^\alpha]$$

上式中の  $\alpha$ 、 $\beta$  は  $c$  に関係する数値であり、近似的に図11(b)の関係がみられる。これより  $\alpha$ 、 $\beta$  を決定して  $K_H$  の近似式を得る。



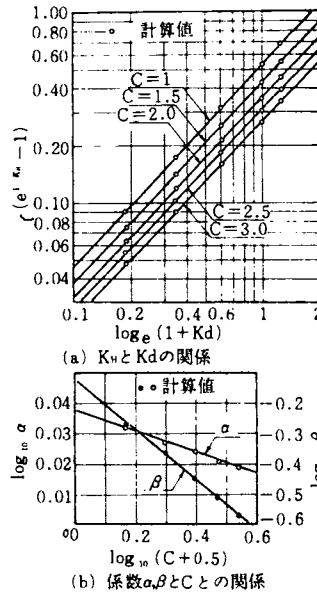


図11 中心線高さの係数  $K_H$  の数値解析

$$K_H = 1 - \log_e \left[ 1 + \frac{0.754}{(c+0.5)^{0.82}} \left\{ \log_e(1+K_d) \right\}^{\frac{1.09}{(c+0.5)^{0.04}}} \right] \tag{11}$$

中心線平均あらし  $R_a$  は次式で与えられる。

$$R_a = \int_0^{\infty} |H - \bar{H}| f(H) dH = 2 \{ \bar{H} - \int_0^{\bar{H}} F(H) dH \} \tag{12}$$

上式右辺の積分項  $\int_0^{\bar{H}} F(H) dH$  は数値計算によって求めるよりほかない。そこで  $c, K_d$  をパラメータとしてこの積分項を数値計算し、その数値と  $K_H$  との関係を検討して  $K_H$  の関数で表わし、 $R_a$  について次式の近似式を得る。

$$R_a = 2 \left\{ \Gamma \left( \frac{c+2.5}{c+1.5} \right) \cdot K_H - 0.696(c+0.5)^{0.13} \cdot K_H^{1.15/c^{0.06}} \right\} K_a^{-\frac{1}{c+1.5}} \tag{13}$$

自乗平均あらし  $R_{rms}$  は次式で与えられる。

$$R_{rms} = \sqrt{\int_0^{\infty} (H - \bar{H})^2 f(H) dH} = \sqrt{\int_0^{\infty} H^2 f(H) dH - \bar{H}^2} \tag{14}$$

上式を  $K_d, c$  をパラメータとして数値計算し  $R_a$  と比較して、実際的範囲では  $R_{rms}$  は  $R_a$  に関して次式で近似表示される。

$$R_{rms} = 1.24 R_a \tag{15}$$

次に、最大高さあらし  $R_{max}$  について検討する。(6)式の分布関数よりわかるように、あらしの高さ  $H$  が大きくなれば  $F(H)$  は無限に 0 に近づき  $H$  の有限確定値は存在せず最大高さを定めることはできない。しかし、あらし  $H$  の形成に関与する砥石中の三日月状立体  $U$  について考えれば、 $H$  が大きくなれば立体  $U$  の体積も大きくなり、立体  $U$  中の平均切れ刃数  $\bar{N}$  がある程度以上に大きくなれば、実際には  $U$  中に切れ刃が一個も存在しないような状態が起り得なくなり、最大高さが定まると考える

ことができる。筆者らは既報<sup>9)</sup>においてこの問題について実験的検討を行ない、そのような限界値  $\bar{N}_m$  の値は 5.5 付近にあるとの結論を得た。

したがって、最大高さあらさ  $R_{max}$  は  $\bar{N}_m$  に対応して(4)式より定めることができる。

$$K_a(R_{max}^{c+1.5} + K_0 R_{max}^{c+0.5}) = \bar{N}_m \quad (16)$$

上式を  $R_{max} = K_a^{-1/(c+1.5)} K_m$  と変数変換して、

$$K_m^{c+1.5} + K_d K_m^{c+0.5} - \bar{N}_m = 0 \quad (17)$$

上の方程式は解くことができないので、 $\bar{N}_m = 5.5$  とし、 $K_d, c$  をパラメータとして数値解法により  $K_m$  の近似根を求める。次に(17)式を変形して、

$$K_m = \bar{N}_m^{\frac{1}{c+1.5}} \left( 1 + \frac{K_d}{K_m} \right)^{-\frac{1}{c+1.5}} \quad (18)$$

$(K_d/K_m)$  の値と  $K_H$  との関係を検討して、 $(K_d/K_m)$  を  $K_H$  の関数として表わし、 $R_{max}$  について次の近似式を得る。

$$R_{max} = 5.5^{\frac{1}{c+1.5}} \left\{ 1 + 0.433(c+0.5)^{0.81} (K_H^{-1.58(c+0.5)^{1.81}} - 1) \right\}^{-\frac{1}{c+1.5}} K_a^{-\frac{1}{c+1.5}} \quad (19)$$

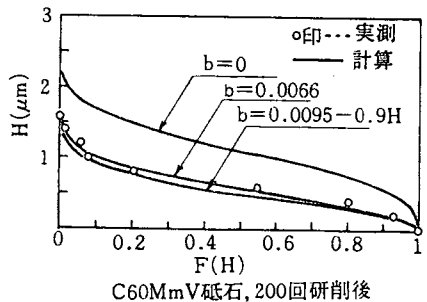
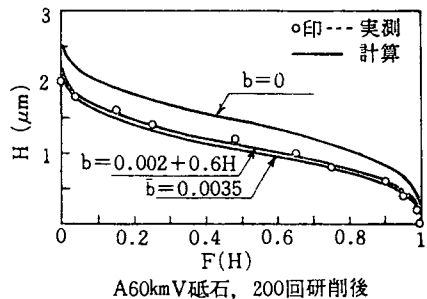
以上において研削仕上面あらさの近似理論式を導いた。これらの式は砥粒切れ刃の摩耗および分布状態の変化について考慮が払われており、従来の式に比べてその内容はより一般化されている。したがって、研削中時々刻々に変化する砥石の実状にかなりこたえることができると思われる。

なお、上述の諸式はプランジ研削について誘導されたものであるから、トラバース研削の場合は式中の  $K_a$  について  $k_s$  の代りに  $jk_s$  ( $j$ : 工作物の同一点研削回数) を用いる。また、切れ刃先端半幅  $b$  を平均値  $\bar{b}$  で代用する場合は式中の  $K_0, K_a, K_d$  に  $b_0 = \bar{b}, m = 0$  を代入する。

### 5. 検 討

前述において、研削中砥石が減耗して砥粒切れ刃の分布状態が変化し、また切れ刃先端が平坦化する現象を考慮して、研削仕上面あらさの式を導いた。そこでこれらの理論式による計算結果と実測結果を比較して、理論式の適合性を検討し、あわせて砥粒切れ刃の因子が仕上面あらさの形成に与える影響について検討する。

まず、研削仕上面のアボットの負荷曲線について(6)式による計算結果と実測結果を比較した。その代表例を図12に示す。これは A60KmV および C60MmV 砥石による 200 回研削後の仕上面について、切れ刃分



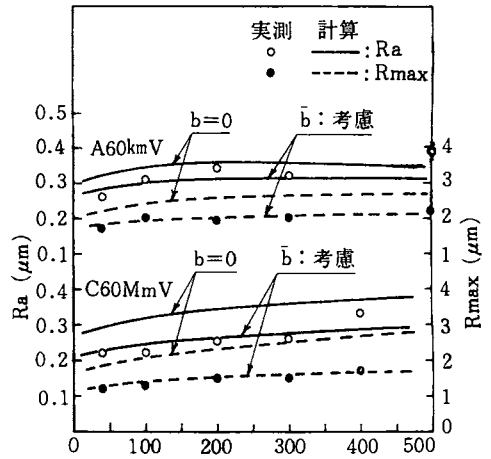
A60KmV砥石による研削,  $D_s=140\text{mm}, v/V=0.0042, \phi=80^\circ, c=2.12, K_s=0.64$   
 C60MmV砥石による研削  $D_s=149\text{mm}, v/V=0.0038, \phi=80^\circ, C=1.35, K_s=1.07$   
 $b$ : 砥粒切れ刃先端半幅 (mm)

図12 研削仕上面のアボットの負荷曲線

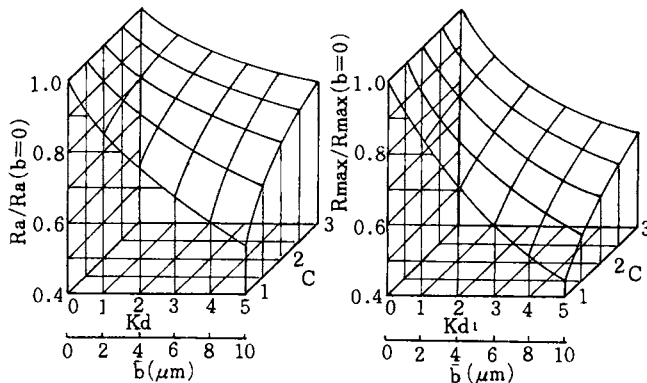
布定数  $c$ ,  $k_s$  に実験値を代入し切れ刃頂角  $2\phi$  を  $160^\circ$  として, 切れ刃先端半幅を,  $b=0$ ,  $b=b_0+ms$   $b=\bar{b}$  (砥石表層  $8\mu\text{m}$  深さの平均値) とした場合の計算曲線を示す。○印は実測値である。この結果から, 切れ刃を円錐形 ( $b=0$ ) とした場合に比べて円錐台形 ( $b=b_0+ms$  および  $b=\bar{b}$ ) とした場合の計算値は低くなり, 実測値にかなり近似することがわかる。また, 円錐台形切れ刃については,  $b=b_0+ms$  とした場合と  $b=\bar{b}$  とした場合の計算値の差は小さく実測値のばらつきの範囲とみてよい。したがって実際的には切れ刃先端幅は数  $\mu\text{m}$  深さの砥石表層についての平均値を用いてもさしつかえないと考えられる。

次に, 研削中切れ刃分布定数  $c$ ,  $k_s$  が図9の曲線に従って変化するものとして, 切れ刃頂角を  $160^\circ$  とし, 切れ刃先端半幅を  $b=0$ , および  $\bar{b}$  が図7の曲線に沿って増大するとした場合の, 研削仕上面の中心線平均あらさ  $R_a$  および最大高さあらさ  $R_{max}$  を(13)式および(19)式により計算した。その結果を図13に示す。上述の結果と同様に, 切れ刃先端の平たん化を考慮した場合の計算値は実測値とかなり良好な一致を示し, 前述の研削仕上面あらさの理論式の適合性はかなりよいとみることができよう。また, 図13より研削が進行すれば砥石が減耗して砥石表層の切れ刃密度が減少し, そのため仕上面あらさは次第に大きくなる傾向をたどるが, 他方, 切れ刃の平たん化の進行は仕上面あらさを抑制する方向に作用することがわかる。

以上の検討により研削中砥粒切れ刃先端が摩耗して平たん化する現象は仕上面あらさの形成にかなり影響を与えることが確かめられた。そこで, その影響度がどの程度のものであるかをさらに検討してみよう。いま,



研削回数  
計算においては,  $\phi=80^\circ$ ,  $c$ ,  $k_s$  は図9の曲線に従いがい,  $\bar{b}$  は図7の曲線に従うものとした。  
図13 研削仕上面あらさの計算値と実測値の比較



$$K_d = \left\{ \frac{\Gamma(c+2.5)}{\Gamma(c+1.5)} \right\} K_a^{\frac{1}{c+1.5}} \{b/(\tan\phi + cm)\}$$

$\bar{b}$  のスケールは  $K_d=500\bar{b}$  とした場合の数値

図14 砥粒切れ刃先端幅が仕上面あらさに与える影響

一般性をもたせるため、あらさを無次元化して  $b=0$  におけるあらさと  $b$  の各値におけるあらさとの比をとり  $R_a/R_a(b=0)$ ,  $R_{max}/R_{max}(b=0)$  として、 $b$  を含む因数  $k_d$  および切れ刃分布形に關係する定数  $c$  をパラメータにとり計算すれば図14のように図示される。 $K_d$  はあらさの形成に關係するすべての因子を含む多様な内容をもつ因数であり理解しにくい点もあるので、實際的数値として  $K_d=500\bar{b}$  とした場合の  $\bar{b}$  のスケールを付記した。この図より  $b$  を除く他の条件が一定ならば  $b$  の増大につれてあらさは減少し、その減少の割合は  $c$  が小さい程大きくなることわかる。また、 $R_{max}$  の方が  $R_a$  よりも  $b$  の影響を強く受けることを示している。

## 6. 結 言

以上の研究の結果を要約すれば次のようである。

- 1) 研削の進行につれて砥石が減耗し、砥粒切れ刃の分布状態が変化し切れ刃の先端は平坦化する。砥石半径方向深さにおける切れ刃先端の平坦化の状態は、砥石表層の約  $5\mu\text{m}$  深さ範囲で起り、 $A$  砥粒の砥石は砥石内部に向って切れ刃先端幅は増大し、 $c$  砥粒の砥石は砥石表面で先端幅は大きく、内部に向うにつれて小さくなる傾向がみられる。また、砥粒切れ刃頂角の平均値は研削中あまり変化せず一般的にみて  $160^\circ$  程度である。
- 2) 砥粒切れ刃を円錐台形と仮定し、砥粒切れ刃の分布は平面的にはポアソン分布に従いがい、砥石半径方向にはべき関数分布すると仮定して、研削仕上面あらさの理論式を導出した。理論値と実験値とを比較検討して、理論式の適合性が良好であることを認めた。
- 3) 研削中の仕上面あらさの変化過程を実験的および理論的に検討し、研削中砥石が減耗し、砥石表層の切れ刃密度が減少すれば仕上面あらさは大きくなる傾向をたどるが、一方、切れ刃先端の平坦化の進行は仕上面あらさを抑制する方向に作用し、両者が相殺的に影響することを認めた。

おわりに、本研究についてご指導を賜わった東北大学工学部、佐藤健児教授、松井正己教授、本学部、杉田忠彰教授、また、研究にご協力をいただいた精密工学科、西川勝信技官の各位に深甚の謝意を表します。

## 文 献

- 1) 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.
- 2) 小野浩二；研削仕上，楨書店（1962），68.
- 3) 小野浩二；と粒切れ刃の形状ならびに分布が研削仕上面あらさに及ぼす影響，日本機械学会論文集30，211（昭39），361.
- 4) 松井正己，庄司克雄；研削仕上面あらさに関する一考察，機械の研究，19，10（1967），1341.
- 5) 1) に同じ。
- 6) 本多良辰，進村武男，高沢孝哉；研削砥石の砥粒切れ刃の分布に関する考察，金沢大学工学部紀要7，1（1973），79.

（昭和48年10月6日受理）