研 究

研削中における砥石切れ刃高さの分布について*

—実験の方法と二、三の結果(第1報)—

玉井 廉人** 河村 末久** 寺田 勝三**

Height Distribution of Cutting Edges in the Grinding Process

—Principle of Analysis and the Experimental Method (1st Report)—

Yasuto TAMAI, Suehisa KAWAMURA, Shozo TERADA

This paper deals with a new experimental method for analyzing the relative height of successive cutting edges in the grinding process. The technique makes it possible to calculate the relative edge height by comparison of the impulsive signal from the small thermo-electric junctions which are so arranged with a short spacing in a grinding path that the individual abrasive grains cut them in grinding. The smaller diameters and distances of wires prepared and the more number of wires contained, the higher accuracy of the measurement is obtained.

The results are as follows:

- (1) The number of effective cutting edges per unit time depends upon the positions in contact zone between wheel and test piece as the result of unevenness of height of cutting edges.
- (2) The relative height of the effective cutting edges distributes within 0.5μ and the distribution is influenced by grinding times of the wheel and table speed.

1. 緒 言

研削砥石の切れ刃に関する問題は材料の除去作用の問題とともに理論上からも実際上からもきわめて重視され、先端の配列や形状、研削中におけるこれらの変化などいずれも重要な研究課題の一つに数えられている。従来の研削理論では取扱い上の簡便さから刃先が円筒面上に等間隔に並んだ砥石モデルを採用することが多かったが、最近では立体的な分布をもつ砥石モデルによって研削現象をより合理的に説明しようとする試みが多く^{1),2)}、この方面の研究に精力的な努力がはらわれている。

切れ刃の平面的な分布は古くは転写法で求めたが、最近では走査法でかなりの精度と迅速さで測定できるようになっている^{3),4)}。しかし個々の切れ刃の高さについては砥粒の切込み深さ以下の超微小値が問題とされるため、計測技術の限界にはばまれ有意な資料をえるのが困難な現状にある。

研削砥石の切れ刃は目なおしに伴う必然性もさることながら、研削中に先端が平坦に摩耗してゆく間にも砥粒の結晶方位、結合橋の支持力、砥粒に作用する研削抵

抗、摩耗状態、切れ刃間隔などの不等性によって先端の高さに不同ができ、精密研削の条件下ではこのような高さは $1/100\mu$ を単位とする超微小値になることが考えられる。

作業面上を触針で走査する直接法のほか最近ではシミュレーションで切れ刃の高さ分布を推定しようとする試みがあるが^{5),6)}、静的な切れ刃の凸凹状態が動的な条件下でもそのまま維持されているとは限らない。

そこで著者達は作用状態での切れ刃に注目し、先端の高さの分布を求めようとした。ここでは切れ刃の作用を熱電的信号として検出しようとした J. Peklenik の方法⁷⁾ を基礎として、接触弧内の各点における切れ刃の作用状態の相違や数個の熱電回路からの信号の不一致から切れ刃の微小な高さの分布を求めることを試みたので、その方法と二、三の解析結果とを報告することにす

2. 測定の原理

金属の工作物中に一定間隔、一直線上に異種金属の細い線を多数埋め込んだ信号検出用の試験片を作り、これを図1のように平面研削盤で上向き研削して熱電的インパルス信号を求め、対応するインパルス信号の有無から切れ刃先端の凹凸を解析する場合について考える。こ

*原稿受付 昭和44年9月6日。昭和44年度春季大会学術講演会(昭和44年4月3日)にて発表。

**正 会 員 防衛大学校機械工学科(横須賀市走水1-10-20)

図 1 切れ刃の通過軌跡と細線的位置関係

で、切れ刃、工作物および発生する信号についてつぎのような仮定を設ける。

イ) 同一円周上の切れ刃に符号 $T_1, T_2, \dots, T_n, \dots$ を与え、切れ刃間隔を $a_{1,2}, a_{2,3}, \dots, a_{n,n+1}, \dots$ で表わす、

ロ) 切れ刃の先端高さは不ぞろいである。切れ刃の高さは最外周上の切れ刃を連ねる円筒面からの後退量 $h_1, h_2, \dots, h_n, \dots$ で表わす。

ハ) 工作物は剛塑性と考え、剛性支持された切れ刃によって予定通過軌跡どおりに除去される。

ニ) 熱電的なインパルス信号は熱接点を中心とする直径 $20 \sim 30 \mu$ の範囲内を切れ刃が通過したとき発生するといわれているが⁸⁾、信号に対する切れ刃の影響範囲は無視する。すなわち信号は熱接点上を切れ刃が通過した結果とみなす(影響範囲を考慮しても本実験ではたかだか 0.07 mm の走査幅である)。

いまある切れ刃 T_n の通過軌跡を図 1 の弧 AB で表わし、これに続くつぎの切れ刃 T_{n+1} が細線部を通過するときの信号の状態を問題にとりあげる。弧 AB 内に含まれている任意の 2 本の細線 W_i, W_j からえられる信号は切れ刃 T_n と T_{n+1} の高さによってつぎのように変化する。

a) $h_{n+1} \leq \delta_i$ の場合

W_i, W_j からほぼ同時に信号がえられる。

b) $\delta_i < h_{n+1} \leq \delta_j$ の場合

信号は W_j からはいえられるが W_i からはいられない。このとき切れ刃 T_{n+1} は図 1 の斜線の範囲内を通過する。

c) $\delta_j < h_{n+1}$ の場合

W_i, W_j ともに信号はいえられない。

ただし δ_i, δ_j は次式のように表わされる値で、 R は円筒面の半径である。

図 2 検出される信号の説明

$$\delta_i = \frac{1}{2R\left(1 + \frac{v}{V}\right)^2} \frac{v}{V} a_{n,n+1} \left(2x_i - \frac{v}{V} a_{n,n+1}\right) + h_n \quad (1)$$

$$\delta_j = \frac{1}{2R\left(1 + \frac{v}{V}\right)^2} \frac{v}{V} a_{n,n+1} \left\{2(x_i + d_{ij}) - \frac{v}{V} a_{n,n+1}\right\} + h_n \quad (2)$$

図 2 はこれらのようすを示したもので、状態(A), (B), (C) はそれぞれ a), b), c) の場合に対応する。したがって切れ刃 T_{n+1} の後退量は接触弧内の任意の 2 本の細線からの信号が図 2 (B) のような不对応状態にある場合にかぎって、 δ_i と δ_j の範囲内で求めることができる。式中の x_i は問題とする切れ刃 T_{n+1} が通過する瞬間における細線 W_i の位置に関する値で、接解弧を図 1 のように考えるとその一端 A からの距離で表わされる。 W_i が接触弧内に含まれるようになった瞬間から、切れ刃 T_{n+1} の通過信号が W_j に発生するまでの時間 t_{n+1} と、二つの切れ刃 T_n と T_{n+1} とが W_j に発生させる信号の時間間隔 t_a とを実測すれば、

$$x_i = \sqrt{2R\left(1 + \frac{v}{V}\right)^2} d - vt_{n+1} \quad (3)$$

$$a_{n,n+1} = Vt_a \quad (4)$$

がえられる。(3), (4) を (1), (2) に代入すると δ_i, δ_j はつぎのように書き改められる。

$$\delta_i = \frac{1}{2R\left(1 + \frac{v}{V}\right)^2} vt_a \cdot \left\{2\sqrt{2R\left(1 + \frac{v}{V}\right)^2} d - v(2t_{n+1} + t_a)\right\} + h_n \quad (1)'$$

$$\delta_j = \frac{1}{2R\left(1 + \frac{v}{V}\right)^2} vt_a \left\{2\sqrt{2R\left(1 + \frac{v}{V}\right)^2} d - v(2t_{n+1} + t_a) + 2d_{ij}\right\} + h_n \quad (2)'$$

以上の式からわかるように、 T_{n+1} の通過に伴う W_i ,

W_j からの信号が不对応をなす場合には、切れ刃の高さの範囲を示す δ_i と δ_j は細線の位置 x_i によって変化する。換言すれば T_{n+1} の信号が不对応信号となるためには、高さの差 $(h_{n+1}-h_n)$ に応じて細線は接触弧内のある範囲内に存在しなければならないことになる。実際には試験片をテーブル速度 v で移動させるので x_i は直線的に減少し、一般的傾向として $(h_{n+1}-h_n)$ の大きい切れ刃はブラウン管上には不对応信号として早く、その小さい切れ刃はおそく描かれることになる。そこで細線を一直線上に多数埋め込んだ試験片を作り、これを研削して多数の不对応信号を求めると、切れ刃高さの差 $(h_{n+1}-h_n)$ の分布状態を知ることができる。

実際には前の切れ刃より突出しているものもこれと同じような分布状態を示すと考えられるので、信号の不对応のみに注目すれば同一円周上の切れ刃の高さの分布を推定できる。

このような実験方法では不对応信号をなす切れ刃の後退量の最大値と最小値の差 σ_{ij} は

$$\sigma_{ij} = \delta_j - \delta_i = \frac{d_{ij}}{R \left(1 + \frac{v}{V}\right)^2} - v t_a \quad (5)$$

で表わされるので、高い精度をうるには細線の間隔 d_{ij} を極力短くしなければならない。

3. 信号検出用試験片

信号検出用の試験片は焼入れした炭素工具鋼 (SK3, Rc63) の2枚の厚い加圧片と数枚の薄いスペーサ、絶縁材および細線とからなっている。

図3は検出用試験片の形状の一例を示したもので、研削される試験片の幅はテーブルの送りと同じ1mmとし、研削中に砥石軸に余分な研削抵抗が作用しないように配慮している。加圧片とスペーサは平面研削したのち入念にラッピングをほどこし鏡面に仕上げる。そしてそれぞれの表面には厚さ0.005mm程度の雲母はくを高い

図3 検出用試験の形状

押しつけ圧を加えて接着させてある。この種の研究でこれまで用いられてきた異種金属の細線は直径0.1~0.2mm程度のものが多いが^{7),8)}、砥石の作業面上を走査する方式と表裏をなすこの実験では、解析の容易さと精度の向上をはかるうえから直線走査が特に望ましい。本実験では切れ刃の摩耗面の大きさに比べて走査幅が無視できるように、直径0.025mmのアドバンス線を用いた。試験片の組み立てはつぎの手順に従った。まず表面を絶縁した加圧片の研削部位にアドバンス線を緊張させ、上から接着剤をつけたスペーサを重ねて3者を固定させる。つぎにこれが硬化したのち、スペーサを介してもとの線に背中合わせに別の線を緊張させる。数層にわたってこの操作を繰り返したのち加圧片をそえて試験片の組み立てを終る。試片の組み立ては顕微鏡下の手作業によるもので、細線が幅1mmの研削部位のほぼ中央にくるように、また数層にわたって細い線が一直線上に並ぶようにするには細心の配慮が必要である。

本実験ではスペーサとして厚さ0.25mmまでのものを使用しており、この際の細線の間隔は最低0.29mmであった。そして連続して一直線上に並ぶ線の数としては3本が有効な範囲内での製作可能な限度であった。

4. 実験の方法と条件

表1 実験条件

砥石 工 作 物 目 な お し	A46MmV, 205×19×50.4 SK3, Rc63, 14×190 10μ×4回, 5μ×2回, 0.05 mm/rev.	
研削 条 件	砥石周速	1930 m/min
	テーブル速度	5, 10, 15 m/min
	切 込 み	10 μ
	送 り	1 mm/ストローク
研削 回 数	研削回数	10, 20, 30 回
測定 条 件	テーブル速度	10 m/min
	切 込 み	10 μ
	測定位置	砥石端面より 1.5 mm

図4 検出回路および走査位置

実験は表 1 に示す条件で, 平面研削盤を用いて行なった. 切れ刃の作用状態を熱電インパルスとして検出するための回路を図 4 に示した.

砥石の使用回数による切れ刃高さの分布状態の変化はつぎのような手法で求めた. まず目なおした砥石で信号検出用試験片と同じ炭素工具鋼を所定の回数まで研削する. つぎにテーブルを前後に移動させ, あらかじめテーブル上の別の位置に準備しておいた信号検出用試験片の研削に移行し, 数回の試行で切れ刃の作用に伴う熱電的インパルスをブラウン管上に描かせ記録する. このような操作を繰り返すことによって摩耗状態に応ずる切れ刃高さの分布の変化を求めることができる. またテーブル速度が切れ刃高さの分布に及ぼす影響を調べるためには研削回数を一定とし, 上述の方法で信号を集めて解析を行なった. なお, いずれの場合にも一直線上に埋め込んだ細線が研削方向に完全に一致するように, また走査位置が図 4 のように砥石端面より 1.5 mm になるように試験片の位置決めには特に留意して実験を行なった.

5. 実験結果

5.1 えられた信号の一例

熱電インパルスの一例を図 5 に示す. これは埋め込んだ細線が 3 本の場合で, 三つの出力信号はそれぞれ細線 W_1 , W_2 , W_3 からのものである (細線は接触弧に入る順序に従って W_1 , W_2 , W_3 , ... とする. 以下同様). 信号の基線が全体に上昇しているのは細線の部分の平均温度の上昇によるためで, 鋸歯状の波形が切れ刃の作用に基づく熱電インパルスである. おのおのの切れ刃が 3 本の

図 5 検出信号の一例

図 6 後退量のある場合の信号

図 7 切れ刃高さと経過時間の関係

細線をほとんど同時に切削している状態がよく現われている.

図 6 は切れ刃の作用状態をより明りょうに示すため信号の時間軸を遅延拡大したものである. 切れ刃はそれぞれの細線をほとんど同時に切削しているが, 矢印の位置では細線 W_1 からの信号には切れ刃が作用した形跡は認められない. これが切れ刃高さの解析に必要な図 2 (B) のような不対応信号である.

5.2 検出のようす

細線が接触弧内を移動する間に, どのような位置で, どのような高さの切れ刃を検出しているのか興味を持たれる. 図 7 は細線数 2 本の場合についてこの関係を示したもので, 横軸の経過時間は細線 W_2 が接触弧内に含まれるようになった瞬間を時間の原点とした. ただし後述するように不対応信号となる切れ刃はたかだか 40% に過ぎないので, 多くの切れ刃は最外周上にあると考えられるため $h_n=0$ として計算し, 測定の幅 σ_{ij} だけを考慮して

$$h_m = \frac{\partial_1 + \partial_2}{2} \quad (6)$$

で切れ刃の高さを表わした. これから, 経過時間 t が増大する (接触弧内で砥粒の瞬間的な切り込み深さは減少する) に従って, 後退量の小さい切れ刃が検出されるようになること, 検出切れ刃数が増大すること, h_m の分布する範囲が減少することなどの傾向が認められる. したがって砥石最外周面に近づくほど切削に関与する切れ刃は多くなり, ほとんどの切れ刃は最外周上にあるといえる.

5.3 作用切れ刃数および作用率

切れ刃の高さに不同があると接触弧内の各点では当然単位時間当りの通過切れ刃数が異なってくる. 図 8, 9 は接触弧内の各点での切れ刃の作用状態の相違を調べたもので, 実線は 1 m sec 当りの各点での作用数を, また

図 8 研削回数による作用状態の変化

図 9 テーブル速度による作用状態の変化

破線は作用率（経過時間が 0~1 m sec 間の作用切れ刃数に対する各点の 1 m sec 当りの作用切れ刃数の割合）を示した。図 8 より研削回数が増加するに従って作用切れ刃数は多くなっていることがわかる。これは使用回数を重ねるに従って砥粒の先端が摩耗し、切れ刃が砥石外周面上に出そろってくるため、砥石の種類によりある一定値に飽和するものである。またいずれの研削回数でも経過時間が増大するほど実際に作用する切れ刃の数は減少している。特に仕上面に最も大きな影響を及ぼす経過時間の終りの部分で作用率が 60% 程度まで低下しているのは注目されることで、平均連続切れ刃間隔にして約 1.7 倍の増加に相当し、研削仕上面の創成機構上考慮しなければならない現象といえる。このように経過時間が大きくなる、いいかえれば砥粒切り込み深さが小さい接触弧の部分で単位時間当りの切れ刃の作用数が少なくなるのは砥粒の切込み深さが小さいために鋸歯状信号が不明りょうとなり信号の見おとしに負うことも考えら

図 10 経過時間と信号数の関係

れるが、これは切れ刃の先端に砥粒切り込み深さのオーダーの微小な高さの差があることを如実に示している。そして研削ではこの程度の高さの差が非常に重要な意味を持っている。図 9 はテーブル速度を変化させた場合である。同じ研削回数ではテーブル速度が遅くなるほど砥粒先端部の摩耗が顕著で、切れ刃は砥石最外周面上に多く現われている。しかし作用率に関してはテーブル速度の影響はほとんど認められない。経過時間が増大するに従って単位時間当りの作用切れ刃数や作用率は減少し、経過時間の終りの部分では作用率が約 60% 程度にとどまることなどは図 8 の場合と同様の傾向となっている。

5.4 切れ刃の高さの分布

以上に示したように信号が不对応となるような切れ刃はただか 40% までで、それ以外はほぼ先端が最外周円上にあるといえる。細線 W_1 に続いて $W_2, W_3 \dots$ が接触弧に入った瞬間から信号の不对応状態に応じて高さが求められたので、切れ刃の高さの分布を表わすことを考える。簡略化するために細線数 2 本の場合をとりあげる。まず W_2 が接触弧に入った瞬間から微小時間 Δt ごとに発生する信号数をそれぞれの回線について順次求める。信号の発生数を十分に多くの結果について求め、その集計を各回線について $N_{I(1)}, N_{I(2)}, N_{I(3)}, \dots, N_{II(1)}, N_{II(2)} \dots$ で表わすと、経過時間に応ずる作用数や不对応数 n_u の変化がわかる。図 10 はこれを模式的に示したものである。信号の対応時間は $l\Delta t$ の間であるが、二細線の関係位置からわかるように W_2 からの信号数を示す曲線は W_1 のそれを $k\Delta t$ だけ移行させたものにほぼ一致するはずである。

したがって測定数を十分に多くすると、 $N_{I(u)}, N_{II(u)}, n_u$ の間につぎの関係が成立する。

$$\{N_{I(u)} + n_u\} / N_{II(u)} \cong 1 \quad (7)$$

$$(\text{ただし } u=1, 2, \dots, l)$$

$$N_{I(u)} / N_{II(u+k)} \cong 1 \quad (8)$$

表 2 接触弧内での作用状態の変化の一例

経過時間 t (m sec)	1	2	3	4	5	6	7
$N_{I(t)}$	187	179	165	135	139	114	105
$N_{II(t)}$	189	187	176	165	170	141	127
$n_{(t)}$	2	8	11	30	31	27	22
$\eta = N_{I(t)} / N_{II(t)} \times 100$	100	99	93.1	87.3	90.0	74.5	67.1

(ただし $t = s, \dots, 0, 1, 2, \dots, l-k$)

$$\{N_{I(t)} + n_{(t)} + \sum_{i=1}^{l-1} n_{(i)} / k\} / N_{II(t)} \cong 1 \quad (9)$$

ここで研削回数 10 回目の砥石による実験結果の一例を示すと表 2 のようになる。これは $k=2$ で $\Delta t=1$ m sec を単位として試行回数 15, すなわちフィルム 15 枚の信号数をまとめたもので、数値を検討してみるとかなりよい結果になっている。

不対応信号となった $n_{(t)}$ 個の切れ刃は作用率と合致させながら高さの分布を表わさなければならないことに留意すると、最終的な作用率は

$$\eta = \frac{N_{I(t)}}{N_{II(t)}} \quad (10)$$

で表わされることや(9)式が成立することから明らかなように ($n_{(1)} \sim n_{(l-1)}$) に含まれる切れ刃は度数を $1/k$ 倍に、 n_l はそのままに数えなければならないことがわかる。

図 11, 12 は最外周円筒面よりも後退している切れ刃 (約 40% の切れ刃がこれに相当する) について後退量の分布状態を示したもので、これに対応する砥石の周長は 480 mm である。図 11 は研削回数による h_m の推移を示したもので、最ひん値は研削回数 10 回では 0.055μ であるが研削回数の増大とともに 20 回で 0.045μ , 30 回で 0.025μ と次第に減少し、尖度は逆に増大して切れ刃が円筒面上に次第にそろってくる傾向が認められる。図 8 の作用切れ刃数から平均連続切れ刃間隔 $\bar{a}$ を求め、これを用いて最大砥粒切り込み深さ $\bar{g}_{\max}$ を計算すると、 $\bar{g}$ はそれぞれの研削回数について 0.15, 0.12, 0.12 μ となることから、これらの切れ刃の約 80% 以上は $\bar{g}_{\max}$ 以下の微少な後退量となっていることがわかる。図 12 はテーブル速度の影響を示したものである。すでに図 9 に示したようにテーブル速度が遅いほど作用切れ刃数は増大するが切れ刃高さ h_m への影響は尖度に鋭く現われ、導出増最ひん値には顕著でない。

これらの結果を通じて、実際に作用する切れ刃の高さはほとんど $\bar{g}_{\max}$ のオーダに分布していることがわかるが、これには砥粒の結晶方位による耐摩耗性や結合橋の支持力などの相違が影響を及ぼしていることがうかがえる。図 13 は砥粒の摩耗面を顕微干涉計で観察したも

図 11 後退している切れ刃の高さの関係

図 12 後退している切れ刃の高さの分布

図 13 摩耗面の顕微干涉計による観察

のである。研削方向につけられた条こんに干渉縞がほぼ直交するようにした写真から、摩耗面上には約 1μ の高低差が各所にあることが認められる。実験の走査幅が 0.025 mm であることを考慮すると写真の結果は上記の実験結果と符合する値となる。摩耗面上に実在するこのような微小な切れ刃の高低差は作用率の変化や不对応信号に見られるように研削作用に微妙な影響を及ぼしていることが指摘できる。

6. 結 論

以上に述べたことを要約するとつぎのようになる。

(1) 工作物中に異種金属の細線を研削方向に数本埋め込み、それらを研削した際に発生する熱電的信号の不对応状態から切れ刃の半径方向の高さの分布を求める方法を導出した。

(2) 切れ刃高さの分解能は $\sigma_{ij} = d_{ij} v t_a / R(1 + v/V)^2$ であらわされる。したがって測定精度は使用する細線の直径と線間隔 d_{ij} が小さいほど良好となる。実際に使用した細線の直径は 0.025 mm で、一直線上に並べた線数は最高3本で、 d_{ij} の最小値は 0.29 mm が製作上の限度であった。

(3) 円筒面上から後退した切れ刃はその後退量 h の大きさに応じて検出が可能な接触弧内での細線の位置関係が定まる。テーブル上を工作物が一定速度で運動する場合には経過時間の短い部分では h の大きい切れ刃が、長い部分では小さい切れ刃が検出される。

(4) 接触弧内の各点では単位時間当りの作用切れ刃の

数が異なる。これは切れ刃の先端の高さに不同があるためで、砥粒の切込みが最大となる部分に比べてそれが最小となる部分では約 60% の切れ刃の作用が認められた。

(5) 複数の信号が不对応となったものを基に切れ刃の高さの分布を求めてみると、これらの約 80% 以上は砥粒切込み深さ以下の値になっていること、研削回数を重ねるに従って後退量の小さい切れ刃が増大する傾向を示すこと、テーブル速度を増大させると高さの分布形状は尖度が増大するようになることなどが認められた。

文 献

- 1) 織岡貞二郎：確率論を応用した研削仕上面創成の理論，日本機械学誌，**63**，499 (1960) 1185.
- 2) 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**，12 (1968) 743.
- 3) 津和秀夫：研削における砥粒の摩耗，機械の研究，**18**，4 (1966) 486.
- 4) 須藤徹也：砥石切れ刃の新しい測定装置，精密機械，**34**，9 (1968) 606.
- 5) J. Peklenik: Contribution to the Correlation Theory for the Grinding Process, Trans. ASME, **86**，1 (1964) 85.
- 6) 吉川弘之，佐田登志夫：モンテカルロシミュレーションによる研削仕上面あらさ創成の研究，精密機械，**35**，4 (1969) 241.
- 7) J. Peklenik: Der Mechanismus des Schleifens und die Überschliffzahl, Industrie-Anzeiger, Nr. 1-3, Januar (1958) 20.
- 8) 牧野秀一，須藤徹也，福島英一：研削過程の実験的追究について，機械試験所所報，**20**，1 (1966) 11.