研 究

コンタクトホイールの弾性変形の効果*

—ベルト研削に関する研究 (第1報) —

松井 正己** 庄司 克雄** 森村 雅史*** 田中 憲司**

The Role of Elastic Deformation of Contact Wheel

—Studies on Belt Grinding (1st Report)—

Seiki MATSUI, Katsuo SYŌJI, Masafumi MORIMURA, Kenji TANAKA

The arc of tool-work interface and cutting force pulses from individual cutting edges in surface belt grinding were investigated to clear the role of elastic deformation of a contact wheel. The arc was measured directly from a workpiece obtained by a quick-stop device enabling the work to be suddenly disengaged from the abrasive belt. The results revealed that the radius of this arc for a comparatively soft contact wheel (durometer index: 35) became even 10-50 times that of the undeformed wheel. The force pulse results were obtained using a high-frequency piezo-electric dynamometer, showing that the active cutting space became greater and inversely the cutting force smaller with reducing the rigidity or increasing the elastic deformation of the contact wheel. This result appearing to be an important factor for high performance of belt grinding was proved by a theoretical consideration on the basis of a grinding model using the radius of arc measured.

1. 緒 言

ベルト研削は、非常に能率の良い加工法として知られている。特に砥石による研削と比較した場合、研削熱の発生が極めて少ない。このため、いわゆるクールカットと称されている。ところで、砥石による研削に対しベルト研削の特長としてまず第一に挙げられることは、工具と工作物とを弾性的に押しつけて切削を行うという点である。しかしコンタクトホイールの弾性変形に伴う工具と工作物の接触長さの増加は、切りくずの排除を阻害し、切りくずと工作物の金属接触の機会を増大させると考えられるから、研削熱の発生は助長されるはずである。

次に、研削ベルトにおいては作業面の砥粒切れ刃密度が非常に小さい。これは、ベルト研削が高い研削能力をもつ一要因であろう。しかし同時に、作業面の砥粒切れ刃分布が粗であると個々の砥粒切れ刃に作用する切削力が過大になり、工具の寿命を短くする。しかるに、ベルト研削においてはほとんど砥粒の大破碎や脱落はなく、切れ刃先端は摩滅して平坦化する。

また研削ベルトと同程度に粗な切れ刃分布を持った研削砥石が製作可能であれば、砥石研削においても同じよ

うな高効率加工が保証されるであろうか。

本研究は、これまで漠然とした形でとらえられていたコンタクトホイールの弾性変形の効果を、実験と理論の両面から解明しようと試みたものである。

2. 研削装置および研削条件

実験に使用したベルト研削装置は小型の精密平面研削盤を改造したもので、図1はその主要部である。コンタ

図1 ベルト研削装置主要部

* 原稿受付 昭和52年1月29日。昭和51年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和51年10月12日)にて発表。

** 正会員 東北大学工学部(仙台市荒巻字青葉)

*** 東北大学大学院(現・日本アイ・ビー・エム(株); 東京都港区六本木3-2-12)

表1 研削条件

研削ベルト	AA 60, AA 100
寸法	30 mm(幅)×915 mm
ベルト張力	5 kg
研削速度	1 400 m/min
テーブル速度	3.3 m/min
コンタクトホイール	溝なし
寸法	150 mm(直径)×40 mm
デュロメータ指数(H_s)	35, 50, 80
研削方式	定切込み, 平面研削
研削液	なし

図2 研削瞬間停止装置

クトホイールは研削盤の砥石軸に取付けた。コンタクトホイールには、アルミ製のカップ型ホイールの外周に約10 mm厚のゴムを焼付け接着したものを使用した。アイドラプーリーには油圧緩衝器を取付けて研削ベルトの振動を少なくした。ベルトの張力はおもりによって与えている。研削時の切込み量は、研削盤の砥石切込み装置を使って与えた。研削条件は表1に示す。

3. 研削ベルトと工作物間の接触形状の測定

コンタクトホイールの弾性変形の結果、与えられた設定切込み量に対して実際に削除される量は小さくなり、いわゆる切残し量が生じることは良く知られている。しかし、同時に起こる研削ベルトと工作物間の接触面積の増加に関しては、これまであまり関心が持たれなかったように思われる。そこで、研削ベルトと工作物を研削途中で分離することによって研削を瞬間的に停止させ、研削時のベルトと工作物間の接触形状を測定した。

3.1 研削瞬間停止装置

筆者らが使用した研削瞬間停止装置を図2に図解する。まず実験に先立って偏心カムにより板ばねを張上げておき、工作物表面を砥石で研削する。次にコンタクトホイールを取付け、表1の条件でベルト研削を開始する。工作物のほぼ中央まで研削したところで、カムを回転して研削ベルトと工作物を分離し、研削を停止させた。

研削停止時の工作物落下速度は、2個のつる巻きばね

(a) 研削瞬間停止によって得られる工作物形状と断面曲線の測定法

(b) 接触形状の例

図3 ベルトと工作物の接触形状の測定法

と板ばね(鋼製)の弾性回復力によって加速される。いま研削ベルトの設定切込み量を Δ 、コンタクトホイールの直径を D 、テーブル速度を v としたとき、落下速度 v_f が

$$v_f \geq 2v \sqrt{\frac{\Delta}{D}} \quad (1)$$

を満足すれば、接触長さに対する影響は無視できる¹⁾。本実験に使用した研削瞬間停止装置では、最初の0.5 mm間の平均落下速度は約14 m/sであった。したがって落下中の切り過ぎは十分無視できると考えられる。

3.2 接触弧の長さ

図3(a)は、研削の瞬間停止によって得られる工作物形状とその測定法を図解したものである。まず工作物の前加工面(砥石研削面)と基準試片面が同一平面をなすように、マグネチックホルダを使い、工作物の側面に基準試片を固定する。これを触針式の表面検査機を使って一定間隔 k で走査し(図の0, 1, 2, ..., n)、研削方向に垂直な方向の断面形状を測定する。その際ローパスフィルタを挿入して表面おうとつの高周波分をカットすると、後のデータ処理に便利である。

次に、それぞれの断面曲線について平均高さを求め、研削方向の距離 x についてこれをプロットすれば、研削方向の平均的な表面形状が得られる。図3(b)に接触形状の例を示す。図で Δ' は研削ベルトの実質切込み量であり、 l_c は研削ベルトと工作物の接触長さである。また原点 $x=0$ は、研削ベルトと工作物の接触が終了する点である。なお図で明らかなように、接触形状を表す曲線

ベルト：AA 400，工作物：S 45 C

図 4 接触長さの測定結果

図 5 接触弧直径と実質切込み量の関係

は $x=0$ の近くで変曲点を持ち傾きが緩やかになる。これは、図 3 (a) からわかるように、研削方向に最も突出した切削痕の先端を便宜上 $x=0$ としたために、ある点 $x=x_c$ (図 3 (a) では、 $k < x_c < 2k$) までは断面曲線に前加工面の平坦部が残る、それが曲線の平均高さを小さくしたことに因る。したがって、もし $x=x_c$ の点を基準点とすれば、図のような変曲点は存在しないと思われるが、実際には x_c の点を見出すことは困難であったので、本研究では図 3 (a) のように基準点を決めた。その場合、接触長さ l_c は断面曲線の平均高さが実質切込み量に等しくなる点 (このときの走査線を n とする) から $x=x_c$ の点までか、あるいは $x=0$ の点までかで議論は残るが、同じ理由から本報では後者を採り、 $l_c = kn$ とした。

図 4 は、コンタクトホイールの硬度をパラメータとして、上述のようにして求めた接触長さ l_c を研削ベルトの実質切込み量 D' に対してプロットしたものである。なお図には砥石についての結果も示してあるが、砥石研削の場合の接触長さは実験の精度内ではほぼ $\sqrt{D D'}$ に等しくなった (砥石 WA 80 HmV，砥石直径 $D=152$ mm)。

さて、図 3 (b) に示した平均的な接触形状は厳密には単純な円弧ではないが、上述したような基準点の取り方による誤差も考慮し、これを理想的な仕上がり面に接する円弧で近似する。その円弧の直径を D_e とすれば、

図 6 圧電動力計の概略図

$$D_e = \frac{l_c^2}{D'} \quad (2)$$

である。式 (2) によって図 4 の結果を書き直すと 図 5 になる。

4. 切削力パルスの測定

コンタクトホイールの弾性変形が研削ベルトの有効切れ刃間隔にどのような影響を与えるかを調べるために、図 6 に示すような圧電動力計 (固有振動数約 30 kHz) を使って個々の砥粒切れ刃に作用する切削力パルスを検出し、電荷増幅器および低域ろ波器 (シャ断周波数 20 kHz，減衰傾度 18 dB/oct) を通して、シンクロスコープで観測した。

個々の砥粒切れ刃の切削力パルスを分離観測するためには、同時研削切れ刃数を 1 以下にする必要がある。そのため、パルス検出用の工作物幅は 0.5 mm にした。その際、コンタクトホイールの弾性変形が通常の研削時と同じになるように、パルス検出部から独立した補助の工作物を検出用の工作物の両側に添えて、全研削幅を 20 mm にした。さらにパルス検出に無関係な工作物からの振動を防ぐために、検出部は防振材で絶縁した。

図 7 は、シンクロスコープで観測した切削力パルスの例である。この例から明らかなように、コンタクトホイールの硬度が高いほど切削力パルス間隔は小さくなり、逆に切削力は大くなる。なお図で縦軸は 1 div. が約 600 g に相当し、横軸は 1 div. が砥石面上で 23.3 mm に相当している。

以上のような観測結果から求めた有効切れ刃間隔と切削力のヒストグラムを、それぞれ図 8 (a), (b) に示す。コンタクトホイールの硬度が低いほど有効切れ刃間隔は大きく、逆に切削力は小さくなる傾向がはっきり認められる。また有効切れ刃間隔、切削力ともに指数分布に類似した分布に従うようである。

ベルト : AA 60, 工作物 : S 45 C, 実質切込み量 : $10 \mu\text{m}$

図 7 シンクロスコープによる切削力パルスの記録例

5. 考 察

いま, 研削ベルトと工作物の接触形状を理想的な仕上り面に接する直径 D_e の円弧と考え,

- (1) 砥粒切れ刃は平均的に先端角 $2\bar{\alpha}$ の円すい形である。
- (2) 研削ベルトの極く表面においては, 砥粒切れ刃は三次元的に一様に分布している。
- (3) コンタクトホイールの硬度を変えても, 砥粒切れ刃の分布密度は変わらない。

と仮定して, 研削ベルトの有効切れ刃間隔と切削力に対するコンタクトホイールの弾性変形の効果について理論的な考察を試みる。

これらの仮定の中で切れ刃角の分布については, その平均値で十分近似できることが明らかにされている²⁾。したがって問題になるのは, 工作物との接触状態において砥粒切れ刃分布を一様と考えて良いかという点と, コンタクトホイールの硬度を変えることによって弾性変形

量が変わっても切れ刃の分布は影響を受けないかという点である。そこで, 同じ研削ベルトを使い, コンタクトホイールの硬度, 押付圧を変えて, 砥粒切れ刃の分布に及ぼす影響を調べた。

図 9 は, 引っかかり法³⁾ で求めた砥粒切れ刃先端の位置の分布の一例である。この例からも明かなように, ベルトの内部ほど切れ刃密度がやや高くなるようである。これは, 研削ベルトの場合砥石と違ってドレンシングを行わないので, ベルト表面における切れ刃高さのばらつきが大きいことに起因している。

一方, コンタクトホイールの硬度および押付圧の影響は, 測定値のばらつきが大きく, 一定の傾向は見い出せなかった(表 2 参照)。しかし砥粒は, コンタクトホイールに比べて比較的剛性の高い接着剤層によって保持されているので, 近接した砥粒間の微小な相対位置はコンタクトホイールの弾性変形量が変わってもあまり変わらないように思われる。したがって近似的には, 上述の仮定は一応妥当なものと推定される。

さて研削ベルトと工作物間の接触形状が円弧で近似できるならば, ベルト研削の問題は直径 D_e , 半径切込み量 d' なる砥石研削の問題に帰着する。すなわち工具と工作物間の巨視的な弾性変形を無視して, 純粋な幾何学問題として扱うことができる。したがって前述の仮定 (1)~(3) が成り立てば, ベルト研削における平均有効切れ刃間隔 w_e は次のように与えられる³⁾。

$$w_e = \frac{\sqrt{W_0}}{\sqrt{\int_0^{\delta_m} P(\delta) d\delta}} \quad (3)$$

ここで, W_0 は砥粒切れ刃 1 個あたりの平均砥石体積(砥粒切れ刃密度の逆数), $P(\delta)$ は有効切れ刃率, δ はベルトの最外周面からの半径深さ, δ_m は有効切れ刃の存在する最大半径深さである。

いま一例として $W_0 = 10 \times 10^{-3} \text{ mm}^3$, $V = 1400 \text{ m/min}$, $v = 3.3 \text{ m/min}$, $\tan \bar{\alpha} = 5.0$, $\bar{n} = 3.3$ を与え, 見かけのコンタクトホイール直径(接触弧直径) D_e , 半径切込み量 d' を変数として w_e を計算した。図 10 はその結果である。図 10 の計算例から明かなように, D_e が大きいほど, すなわちコンタクトが軟らかいほど, w_e は大きくなる。

さて研削幅(パルス検出幅)が b であるときの有効切れ刃間隔 c の確率密度関数 $f(c)$ は

$$f(c) = \frac{1}{w_e^2} (b + 2\bar{g}_m \tan \bar{\alpha}) \exp\left(-\frac{b + 2\bar{g}_m \tan \bar{\alpha}}{w_e^2} c\right) \quad (4)$$

で与えられ, その平均値 $\bar{c}$ は

$$\bar{c} = \frac{w_e^2}{b + 2\bar{g}_m \tan \bar{\alpha}} \quad (5)$$

ベルト : AA 60, 工作物 : S45C, 実質切込み量 : $10\ \mu\text{m}$

一点鎖線は平均値を示す

図8 有効切れ刃間隔と切削力のヒストグラム

ベルト : AA 400

図9 粒砥切れ刃先端の位置の分布

表2 砥粒切れ刃密度($1/W_0$) (個/ mm^3)
の測定結果, ベルト AA 100

コンタクトホイール硬度 (H_s)	押付圧 P (kg/30 mm)			
	3		5	
	平均値	標準偏差*	平均値	標準偏差*
35	80.6	18.6	76.6	30.4
80	75.1	29.2	84.1	18.1

* 不偏分散の平方根

図10 平均有効切れ刃間隔の計算例

で与えられる⁴⁾。ここで $\bar{g}_m$ は最大砥粒切込み深さの平均値である。式(4)または(5)で、コンタクトホイールの硬度が低いほど w_e は大きくなり、逆に $\bar{g}_m$ は小さくなる^{*}。したがって研削幅が b であるときの有効切れ刃間隔 c は、コンタクトホイールの硬度が低いほど大きくなる。この傾向は図8(a)の結果と良く一致する。

次に砥粒切れ刃に作用する平均の切削力 f_n は、研削抵抗の垂直分力を N 、平均の同時研削切れ刃数を m とすると、

$$f_n = \frac{N}{m} \quad (6)$$

で与えられる。式(6)は、接触弧の長さ l_c と平均有効切れ刃間隔 w_e を使って、次のように書き替えられる。

$$f_n = \frac{N}{\left(\frac{l_c b}{w_e^2}\right)} = \frac{N}{b} \left(\frac{w_e^2}{l_c}\right) \quad (7)$$

式(7)で、 N は、実質切込み量 d' が同じであれば、コンタクトホイールの硬度とはほとんど無関係にほぼ同じ大きさになるが、 w_e と l_c はコンタクトホイールが軟らかいほど大きくなる。しかし w_e^2 の増加率(図10参照)に比べて l_c の増加率(図4参照)の方が数倍大きいから、結局、コンタクトホイールの硬度が低いほど切削力 f_n は小さくなる。これは図8(b)の結果と一致する。

以上の結果によれば、同じ研削ベルトを使ってもコンタクトホイールの硬度が低ければ有効切れ刃間隔は大きくなり、逆に個々の砥粒に作用する切削力は小さくなる。通常の場合、切りくずの排出を良くするために切れ刃密度を低くすると、個々の砥粒の切削力が大きくなる。これは砥石の摩耗量を増加させると同時に仕上面粗さを悪くする。しかしベルト研削の場合には、コンタクトホイールの弾性変形の作用によりこの欠点が補足される。たとえば図8の $Hs 80$ と $Hs 35$ の場合を比較すると、有効切れ刃間隔 c は約1:2、切削力は約3:2の割合になっている。いま単純に、有効切れ刃間隔はチップポケットに比例し、切削力は切りくず面積に比例すると考えると、コンタクトホイール硬度を $Hs 80$ から $Hs 35$ にした場合、チップポケットは約2倍になり、逆に切りくず断面積は2/3になる。したがって切りくずの排出は非常に良くなるはずである。これは、弾性変形の大きいコンタクトホイールと変形の少ないホイールの比較である。ベルト研削と砥石研削を比較した場合には、効果はより顕著であろう。

* 個々の砥粒切れ刃に作用する切削力は、近似的に g_m^2 に比例すると考えることができる⁵⁾。図8(b)のヒストグラムから明らかなように、コンタクトホイールの硬度が低いほど切削力は小さくなる。このことは、コンタクトホイールの硬度が低いほど、 $\bar{g}_m$ もまた小さくなることを示している。

さらに注目すべきことは、個々の砥粒に作用する切削力である。文献4)の図12、図14は、砥石研削における有効切れ刃間隔と切削力の実測結果である。この結果と本報の図8の $Hs 35$ の結果とを比較すると、ベルト研削の場合有効切れ刃間隔は砥石の十数倍であるのに対して、切削力はほとんど同じ大きさである。

以上は、コンタクトホイールの硬度の面から弾性変形の効果を議論したものである。しかし軟質のコンタクトホイールの場合、切込み量を増すと D_e は大きくなるから(図5参照)、切込み量を増すことによってコンタクトホイールの硬度を小さくしたのと同様の効果が期待できる。

このようにベルト研削においては、コンタクトホイールの弾性変形によって、個々の切れ刃の切削力が緩和されると同時に、切りくずの排出が良くなる。ベルト研削が非常に能率の良い加工法であるといわれる一因は、このようなコンタクトホイールの弾性変形の効果にあると思われる。

6. 結 言

コンタクトホイールの弾性変形がベルト研削にどのような影響を及ぼすかを明らかにするために、個々の砥粒切れ刃に作用する切削力を圧電動力計を使って測定した。その結果、コンタクトホイールの硬度が低いほど有効切れ刃間隔は大きくなり、しかも個々の切れ刃に作用する切削力は小さくなることが明らかになった。これは切れ刃に作用する切削力を緩和すると同時に、切りくずの排出を良くする効果があり、ベルト研削が非常に能率の良い加工法であるといわれる一因である。なおこの結果は、実測した工作物-工具間の動的接触長さを基にした研削モデルからも、理論的に確かめられた。

おわりに、圧電動力計とコンタクトホイールの製作にあたって協力を賜った東北ゴム(株)の今村光一、大久保孝治の両氏に感謝の意を表する。

文 献

- 1) W. J. Sauer and M. C. Shaw: The Role of Elastic Deformation of the Wheel Work Interface in Surface Grinding, Proc. Int. Conf. Prod. Engg., Tokyo, (1974).
- 2) 松井正己: 研削仕上面あらさに及ぼす砥粒切れ刃先端角と強制振動の影響, 精密機械, 38, 12 (1972) 142.
- 3) 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.
- 4) 松井正己, 庄司克雄: 統計的手法による研削機構の考察(第3報), 精密機械, 37, 10 (1971) 708.
- 5) 松井正己, 庄司克雄: 統計的手法による研削機構の考察(第2報), 精密機械, 36, 3 (1970) 196.