研 究

研削ベルトの摩耗に及ぼすコンタクト ホイールの弾性変形の影響*

——ベルト研削に関する研究（第2報）——

松 井 正 己** 庄 司 克 雄** 田 中 和 彦***

Effects of Contact Wheel Hardness on Belt Wear
—Studies on Belt Grinding (2nd Report)—

Seiki MATSUI, Katsuo SYŌJI
and Kazuhiko TANAKA

It was found in the previous report that the elastic deformation of contact wheel performs a significant role in belt grinding. This paper deals with the effect on the wear process of coated abrasive belts. The contact-wheel surface grinding was carried out at a fixed infeed, and the changes of belt wear rate and surface topography with grinding time were investigated. Grinding force pulses from individual cutting edges were also observed in a fixed part on the belt surface. The force pulses were obtained

by lengthwise grinding of a very narrow workpiece attached to a high-frequency dynamometer. Detail investigations of the change of them with time made clear the rise and fall process of the cutting edges. The results revealed that the wear property is influenced by the contact wheel hardness. With a harder contact wheel the change from old to new cutting edges is smooth and prosperous. On the contrary, too soft a contact wheel brings about flattening or dulling of cutting edges and accounts for the glazed appearance of abrasive belt.

Key words: contact wheel hardness, belt wear, belt grinding, coated abrasive belt, grinding force pulse, high-frequency dynamometer.

1. 緒 言

ベルト研削は、研削熱の発生が少なく、能率の良い加工法として知られている。ベルト研削のこのような特長は、コンタクトホイールに起因すると考えて、第1報¹⁾では、研削機構に対するコンタクトホイールの弾性変形の影響について検討した。

ところでベルト研削は、このように優れた加工法であるにもかかわらず、生産現場への普及という点では、未だしの感がある。その最大の原因は、加工精度が不十分であることと、工具コストが高いことにあると考えられる。とくに後者は、スローアウェイ工具である研削ベルトの宿命の問題点であり、工具寿命の向上は、今なおベルト研削における大きな研究課題の一つになっている。その一つのアプローチとして、研削ベルトの摩耗特性が種々の条件の下で調査され、報告されている²⁾³⁾。しかし先の報告¹⁾で明らかにしたように、ベルト研削では、個々の砥粒切れ刃に作用する研削力は、コンタクトホイールの弾性変形によって大きく左右される。したがって砥

石による研削の場合のように、工具の摩耗特性を研削条件だけの関数として扱うことはできない。そこで本研究では、とくに、コンタクトホイールの弾性変形が研削ベルトの摩耗過程に及ぼす効果について調査した。

2. 実験装置および実験方法

2.1 研 削 装 置

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、その詳細については前報¹⁾で述べたので、ここではその主要部についてだけ述べる。コンタクトホイールは、砥石軸に取り付けている。アイドラプリーは、2個のボールプッシュで支持し、滑車とおもりを使ってこれを上方に引張ることによって、ベルトに張力を与えた。アイドラプリーの振動を防ぐために、油圧緩衝器を付設した。コンタクトホイールには、アルミニウム製のカップ型ホイールの外周に約10 mm厚さのゴムを焼付け接着したものを使用した。研削条件は表1に示す。

2.2 砥削抵抗およびベルト摩耗量の測定

研削ベルトの摩耗に伴う研削性能の変化を調べるために、研削抵抗を測定した。研削抵抗は、八角弾性リング式動力計によって、垂直成分と接線成分を検出し、ペンオシロスコープで記録した。また実切込み量は、1行程ごとに工作物の寸法減を1/1 000 mm目盛のダイヤルゲ

* 原稿受付 昭和57年10月18日、昭和57年度精機学会東北支部米沢地方講演会(昭和57年6月5日)にて発表。

** 正 会 員 東北大学工学部(仙台市荒巻字青葉)

*** 仙台市役所(仙台市国分町3-7)

Table 1 Grinding conditions

Abrasive belt	AA 60
Size	30 mm wide×915 mm long
Grinding speed	1 400 surf-m/min
Table speed	3.3 m/min
Contact wheel	rubber, aluminium (Al)
Durometer index	35, 50, and 80 (rubber)
Size	150 mm dia×40 mm wide
Grinding type	horizontal surface grinding
Coolant	air (dry)

ージで測定することによって求めた。

研削ベルトの摩耗量は、通常、ベルト厚をマイクロメータなどで直接測定して求める方法が採られている。この方法は、簡便で実用的ではあるが、精度の点でやや問題があると思われる。そこで本研究では、砥石の摩耗量測定にしばしば用いられている転写法を採用した。転写の際は、弾性変形の大きいコンタクトホイールを使用すると、摩耗によって生じたベルト表面の段差がコンタクトホイールの弾性変形によって相殺されてしまうので、いずれの場合にもアルミニウム製のコンタクトホイールを使用した。なおアルミニウムホイールは、砥石軸に取付け後、その都度円筒面を精密旋削し、取付けによる偏心の影響が及ばないよう配慮した。

2.3 砥粒切れ刃密度の測定

筆者らは先に、触針法による砥粒切れ刃密度の測定原理について考察した⁴⁾。研削ベルトにおいては砥粒切れ刃密度が非常に粗であるから、この測定法は砥石の場合に比べて有力である。

研削ベルト表面の凹凸のプロファイルは、検出器を研削盤テーブル上に固定し、ベルトを超低速で回転させることによって行った。この際コンタクトホイールは、アルミニウムホイールを使用した。触針には、エッジ長1 mmのナイフエッジ型ダイヤモンド触針を、変換器には非接触ゲージを用いた。触針による走査は、研削ベルトの全長915 mmについて行った。

2.4 研削パルス列の測定

突出した先行切れ刃の摩耗や破碎による後退に伴って、これまで直接切削に関与しなかった砥粒切れ刃が切削に関与し始める。研削時間に伴うこのような切れ刃の消長過程を知ることは、研削ベルトの摩耗特性を理解する上で非常に重要である。そこで前報¹⁾で使用した圧電動力計を使用し、研削ベルトの一定箇所における個々の砥粒切れ刃によって生ずる研削パルス列を検出記録した。図1に測定方法の概略図を示す。研削パルス検出用の工作物の幅は、同時研削切れ刃数がつねに1以下になるよう、0.5 mmとした。さらに研削時のコンタクトホイールの弾性変形が、通常の研削の場合と同じになるよ

Fig. 1 Arrangement for measurement of grinding force pulses from individual cutting edges

うに、研削パルス検出用の工作物の両側に、研削パルス検出には無関係な補助の工作物を取り付けて、全研削幅を20 mmにした。そのため、補助の工作物の研削による振動が研削パルス検出に悪影響を与えないよう、検出部は防振ゴムを介して支持している。また研削ベルトの同一箇所での研削パルス列を記録するために、ベルトの回転に同期させたタイミング信号を発生させ、それによってオシロスコープをトリガした。タイミング信号は、図1に示したように、研削ベルトに小孔を設け、この小孔を通過する光を研削ベルトの裏側に設置したフォトランシスタで受けて発生させた。

研削パルス列の測定は、連続研削中に適宜、動力計を研削盤テーブル上に取り付けて行った。その際、研削ベルトの幅方向の検出位置が変化しないよう、位置決めピンを設けて動力計がつねに一定位置に取り付けられるよう配慮した。

3. 実験結果

3.1 工具・工作物干渉量と実切込み量との関係

ベルト研削では、コンタクトホイールの弾性変形が大きいので、幾何学的な工具・工作物干渉量と実切込み量との間に大きな差が生じる。したがって実切込み量一定の実験を行うには、あらかじめ工具・工作物干渉量と実切込み量との関係を求め、その結果に照らして最初の設定切込み量を与える必要がある。そこで設定切込み量(Downfeed)を20 μmにして連続研削を行い、工具・工作物干渉量と実切込み量との関係を求めた。なお、 n 回目の行程における幾何学的な工具・工作物干渉量 $d_n'(\mu\text{m})$ は、次式で計算した。

$$d_n' = 20 + \sum_{i=1}^{n-1} \delta_i \quad (1)$$

ここで $\delta_i(\mu\text{m})$ は、 i 回目の行程における切残し量で、

その行程における実質切込み量を Δ_i (μm) とすれば,

$$\delta_i = 20 - \Delta_i \quad (2)$$

である。

図2は、各種コンタクトホイールについて、実切込み量が設定切込み量 ($20\mu\text{m}$) になるまでの工具・工作物干渉量と実切込み量との関係を示す。当然のことながら、コンタクトホイールの硬度が低い場合には切残し量が大きくなり、たとえばデュロメータ指数 (H_s) 35 のコンタクトホイールの場合、 $20\mu\text{m}$ の実切込み量を得るために約 $550\mu\text{m}$ の工具・工作物干渉量を与える必要がある。

3.2 研削ベルトの摩耗量と研削抵抗

図2の結果を用いて、 $20\mu\text{m}$ の実切込み量に対応する工具・工作物干渉量をあらかじめ設定切込み量として与え、各行程の実切込み量が最初から定常的に $20\mu\text{m}$ になるようにして連続研削を行い、研削抵抗とベルト摩耗量を測定した。図3は、コンタクトホイールの硬度をパラメータにして、研削ベルトの累積摩耗量と研削抵抗の変化を研削回数についてプロットした結果である。この結果によれば、研削抵抗はコンタクトホイールの硬度が低いほど大きく、とくに $H_s 35$ の場合には、研削回数1000回以後研削抵抗が急増し、約1500回で寿命点に達する。他方、研削ベルトの摩耗量はコンタクトホイールの硬度が高いほど大きく、とくに研削回数100回程度までの初期摩耗においてその差が顕著である。

3.3 砥粒切れ刃密度の変化

研削ベルト表面の断面曲線の記録例を図4に示す。断面曲線の測定は、研削ベルトの全長915mmについて行った。その最も突出した砥粒切れ刃を最外周面とし、最外周面から切れ刃頂点までの深さを測定して、ヒストグラムを求めた。図5は、硬度 $H_s 35$, $H_s 80$ のコンタクトホイールについて、研削回数に伴う砥粒切れ刃の分布状態の変化を調べた結果である。コンタクトホイール $H_s 80$ の場合は、研削初期に最外周面近くの砥粒切れ刃密度が急激に増大し、定常状態になる。これに対して硬度 $H_s 35$ のコンタクトホイール使用の場合には、最

Fig. 2 Relationships between actual depth of cut and tool/work interference for various contact wheels

Fig. 3 Effects of contact wheel hardness on belt wear and grinding force

Fig. 4 Typical trace of surface profile of a coated abrasive belt

Fig. 5 Variations of cutting edge density with the number of grinding passes
 N_g : The number of grinding passes, n_s : The number of cutting edges in 915 mm length of stylus trace

Fig. 6 Typical oscilloscope traces of grinding force pulses for H_s 35 contact wheel

外周部の切れ刃密度が増大する速度は遅く, 1000 回の研削回数ではほぼ定常状態になる。

3.4 砥粒切れ刃の消長過程

図 6 は, 研削ベルトの同一部分からの研削パルス列を研削回数を追って観測した結果の一例である。この結果から, たとえば切れ刃 A, D のように 摩耗または破碎・脱落によって研削に直接関与しなくなった切れ刃, 切れ刃 B, C のように 先行切れ刃の後退によって新たに研削に関与するようになった切れ刃の識別が可能である。図 7 は, このようにして, 最初からの有効切れ刃と各測定時における新生有効切れ刃とを色分けし, 研削回数に伴う砥粒切れ刃の消長過程を図示したものである。研削ベルトの被検長は 467 mm である。

この結果によれば, コンタクトホイールの硬度が高い場合には, 摩耗や破碎による切れ刃の後退が大きく, 最初の切れ刃は研削回数 500 回の時点でほとんど後退し消失する。これに対してコンタクトホイールの硬度が低く弾性変形の大きい H_s 35 の場合には, 研削回数 1500 回の時点で, 最初の切れ刃がなお有効切れ刃として残存した。

4. 考 察

図 3 に示した結果によれば, コンタクトホイールの硬

Fig. 7 The rise and fall process of cutting edges

Fig. 8 Mean grinding force imposed on every individual cutting

度が高いほど研削抵抗は小さいが, 研削ベルトの摩耗量は逆に大きくなる。この結果は, 一見矛盾しているかのように思われる。しかし研削ベルトの摩耗量を左右するのは, 研削ベルト全体に作用する研削抵抗ではなく, 個々の砥粒切れ刃に作用する研削力である。そこで図 6 に示した研削パルス列から, 個々の砥粒切れ刃に作用する平均研削力を求め, コンタクトホイールの弾性変形の影響を検討した。その結果を図 8 に示す。研削ベルトの静的切れ刃密度を一定とした場合, コンタクトホイールの弾性変形が大きいほど, すなわちコンタクトホイールの硬度が低いほど, 個々の砥粒切れ刃に作用する研削力は小さく, 有効切れ刃率が低くなることは, すでに前報¹⁾で理論的に明らかにされた。図 8 の結果は, この解析結果とよく一致する。このような硬度の低いコンタクトホイールを使用すると, 工具・工作物間の見かけの接触弧半径が増大するため¹⁾, 個々の砥粒切れ刃に作用する研削力は減少する。その結果, 研削抵抗の増大にもかかわらず, 研削ベルトの摩耗量は減少する。

コンタクトホイールの硬度が高いと初期摩耗が大きいことも, 同様に説明できる。とくに研削初期には砥粒切れ刃密度が低いので, コンタクトホイールの弾性変形の

Fig. 9 SEM stereo-pair for a glazed grain on the AA 60 abrasive belt after 1500 grinding passes using H_s 35 contact wheel

影響が大きく作用する。このため、硬度の高いコンタクトホイールを使用すると、研削初期にベルト最外周部の突出した切れ刃が摩耗もしくは破砕によって後退し、砥粒切れ刃密度が増大する(図5)。図8で、 H_s 80の場合、研削初期に平均研削力が急減するのは、この時期に砥粒切れ刃密度が増したためである。コンタクトホイールの硬度が高い場合には、その後も個々の砥粒切れ刃に作用する研削力は比較的高く、新旧切れ刃の交替は順調に行われる(図7)。このため研削ベルトの摩耗量が大きいにもかかわらず、研削抵抗の増加率は比較的小さい(図3)。

これに対して硬度の低いコンタクトホイールを使用した場合には、個々の砥粒切れ刃に作用する研削力が小さいために(図8)、研削ベルトの最外周部の砥粒切れ刃の後退が少なく、砥粒切れ刃密度の増加は緩やかである(図5)。したがって新旧切れ刃の交替も非常に緩慢で、研削回数1500回の時点ではなお最初の切れ刃が有効に作用している(図7)。この結果、古い切れ刃が目つぶれ状態になり、研削ベルトの摩耗量が比較的小さいにもかかわらず、研削抵抗が急増する。

図9は、1500回研削後の研削ベルト表面における砥粒切れ刃の走査電顕によるステレオ写真*である。コン

タクトホイールは、 H_s 35のものを使用した。砥粒切れ刃先端は摩滅し、大きな平坦部が生じて、目つぶれしている様子が明らかである。また平坦部には、研削方向(写真で、砥粒の移動方向は上向きである)に摩耗条痕が認められる。

このようにコンタクトホイールの硬度が低すぎると、新旧切れ刃の交替が順調に行われず、目つぶれ状態になり、ベルトの寿命が低下する。したがってこのような場合には、テーブル速度を大きくするなど、研削盤の能力の許す範囲内で、個々の砥粒切れ刃に作用する研削力が大きくなるような研削条件に修正する必要がある。

5. 結 論

研削ベルトの摩耗過程に対するコンタクトホイールの弾性変形の影響について調べた。以下に、得られた結果を要約する。

- (1) コンタクトホイールの硬度が高いほど研削抵抗は小さいが、研削ベルトの摩耗量は逆に大きくなる。
- (2) コンタクトホイールの硬度が高いと、とくに研削ベルトの初期摩耗が大きい。初期摩耗においては、研削ベルト最外周部の突出した砥粒切れ刃が後退し、砥粒切れ刃密度が高くなる。
- (3) コンタクトホイールの硬度が高いと、個々の砥粒切れ刃に作用する研削力が大きいため、切れ刃の新旧交替が順調に行われる。逆にコンタクトホイールの硬度が低すぎると切れ刃の交替が緩慢になるため、古い切れ刃が目つぶれ状態になり、研削ベルトの寿命が低下する。

参 考 文 献

- 1) 松井正己, 庄司克雄, 森村雅史, 田中憲司: 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), 精密機械, **44**, 2 (1978) 155.
- 2) 難波義治, 津和秀夫: 研摩ベルトの摩耗過程——ベルトの研削に関する研究(第3報), 精密機械, **38**, 2 (1972) 202.
- 3) 米津 栄, 稲崎一郎, 柴田順二, 黒崎武文: 研削ベルトの摩耗と研削特性——研削ベルトの研削作用に関する研究(第2報), 精密機械, **40**, 3 (1974) 221.
- 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)——二, 三の実験的考察, 精密機械, **37**, 10 (1971) 708.

* 2枚の写真の間に、両面白色のハガキ大の厚紙を縦にして立て、左右の眼でそれぞれ別の写真を同時に見れば、立体視が可能である。立体視を容易にするには、専用の器具を使用すると良い。