ベルト研削における振れの除去過程に関する 解析的検討*

樋口 静一** 種房 英利*** 斎藤 義夫** 花岡 忠昭**

Numerical Estimations of the Deflection-Reducing Process in Belt Grinding

Shizuichi HIGUCHI, Hidetoshi TANEFUSA, Yoshio SAITO and Tadaaki HANAOKA

This research aims at developing a method of numerical calculations and clarifying the characteristics of a roundness error reducing process in rubber contact wheel type belt grinding. Cylindrical plunge belt grinding was carried out on the eccentric workpieces in place of workpieces having a roundness error. Judging from the results obtained by comparing the eccentric workpieces with the normal round workpieces, there was little difference in the forming process, regardless of the infeed conditions. Therefore, a model of the deflection-reducing process of the eccentric workpiece was estimated. Using this model, a deflection-reducing process by numerical calculations was proposed and it was confirmed that its results were in close agreement with the experimental results. So, the effects of the grinding conditions on the deflection-reducing process were calculated. As a result, the characteristics and problems were clearly recognized for the grinding of eccentric workpieces.

Key words: numerical calculation, belt grinding, rubber contact wheel, eccentric workpiece, roundness error, deflection-reducing process

1. はじめに

従来の研削過程を改善し、加工能率や加工精度の向上のため、クリープフィード研削やスピードストローク研削が議論されてきた。この高能率と高精度はベルト研削にも要求されつつある。砥石車による研削に対し、ベルト研削は、そのような重研削に適していることは良く知られている。また、工作物に大きな寸法誤差やバリ等が存在した場合、加工時には非常に大きな切込み量の変動を生ずる。そのような場合、砥石車による研削では、砥石車の破壊の恐れがあるのに対し、ベルト研削では、上記の問題には比較的容易に対処できる。すなわち、通常ゴム製のコンタクトホイールで研磨ベルトをバックアップして研削を行うため、研磨ベルトが工作物に対し弾性的に接触しているからである。このため、偏摩耗したロールの研磨やバリの除去等に非常に有効な研磨効果を発揮するものと考えられる。

しかし、ゴムコンタクトホイールの弾性変形は、寸

法誤差を完全に除去することや精度の高い加工物を得ることを難しくしている¹⁾²⁾。そのため、寸法誤差を除去する有効な方法を検討する必要がある。そこで、本研究では切込み量変動する場合の研削過程について検討を行い、その特徴と問題点の明確化を試みた。

まず最初に、寸法誤差を有し、切込み量変動する場合として、偏心した円筒工作物に対し定切込み速度の円筒ブランチ研削を行った。その円筒工作物の円周上の各部における研削量を測定し、切込み量変動する場合の形状生成過程を調べた。その結果より、ゴムコンタクトホイールの弾性的性質に基づき、振れの除去過程に関する数値計算を行った。計算方法は通常の円筒工作物の形状生成過程を理論的に適用したものであり、振れの除去過程の計算値は実験値と良く一致した。そこで、設定切込み速度、研削開始時の振れの量、コンタクトホイールのゴム硬さを変化して計算を行い、研削条件の変化が振れの除去過程に及ぼす影響について明らかにした。

2. 偏心工作物の形状生成過程

取り代が変動する工作物として偏心した円筒に対して、定切込み速度の円筒ブランチ研削を行い、工作物の形状生成過程を調べた。工作物は図1に示すように

* 原稿受付 平成元年9月16日、昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和61年10月11日)にて発表

** 正会員 千葉大学工学部(千葉市弥生町1-33)

*** 千葉大学大学院(現在、東京電力(株)；横須賀市久里浜9-2-1)

Table 1 Experimental conditions

Grinding speed	1 240 m/min
Workpiece speed	17.6 m/min
Infeed rate	5-20 $\mu\text{m}/\text{rev}$
Abrasive belt	AA # 80
	50 mm(W) $\times$ 1 525 mm
Contact wheel	rubber (Hs 30, 50, 70)
	200 mm(D) $\times$ 50 mm(W)
	plane
Workpiece	S 45 C
	20 mm(W) $\times$ 80 mm

切込み量の増加に伴い、偏心した工作物は徐々に円筒に近くなる。そして、ゴムが軟らかい Hs 30 の場合は、硬い Hs 70 の場合に比べて工作物形状の変化が緩慢となり、切込み量の増加に対する振れの減少が少なくなる。

この偏心した工作物の形状の変化より、各研削点の研削量を調べた。図 4 はコンタクトホイールが Hs 70 の場合において、工作物外周上で 45° ごとに点について、累積研削量の変化を示したものである。研削開始後、研磨ベルトの切込み量の増加に伴い、徐々に角度 θ が大きい部分の研削が進行していく様子がわかる。この各部の累積研削量を、各部における研磨ベルトの設定切込み量で整理したものが図 5 である。この図より、偏心した円筒工作物の各部の研削量は、ほぼ 1 本の曲線に一致する。さらに、その曲線の形状は通常の円筒工作物を研削した場合と同様の形状を示す。すなわち、研削開始直後はゴムコンタクトホイールの弾性変形のため、設定切込み量に対し、切残しを生ずるが徐々に研削量が増加し、やがて設定切込み量と実切込み量がほぼ等しくなる¹⁾。ゴム硬さが軟らかい Hs 30 の場合には、その弾性変形が増加するため研削開始直

後の切残し量が増加する。従って累積研削量の増加は Hs 70 の場合より緩慢となるが、同様の結果が得られた。このことより、切込み量が変動する場合においても、工作物各部における、設定切込み量の増加に対する累積研削量の関係は、ほぼ同様に増加しており、各部の形状生成過程には、ほとんど変化を生じていないことがわかる。そして、切込み量が増加する部分 (θ が正) と減少する部分 (θ が負) の比較を行った場合においても、形状生成過程にほとんど変化はみられなかった。

3. 偏心工作物における形状生成過程の数値計算方法

前節では、偏心した円筒工作物の各部における形状生成過程を、寸法誤差の無い円筒の場合と比較すると、ほとんど変わらないことが明らかにされた。一方、ゴムコンタクトホイールを使用し、寸法誤差の無い円筒工作物に対してプランジベルト研削を行った場合の形状生成過程は、既に解析的に明らかにされている¹⁾。そこで、偏心量を有する円筒工作物の振れの除去過程を図 6 に示すように考えた。

図 1 に示した偏心工作物 (偏心量 δ) を円筒プランジ研削した場合、まず回転中心 O' から最も振れの大きい P 点の研削が開始される。そして Q 点は最後に研磨ベルトと接触する位置である。研削時間の経過に伴い P 点の累積研削量は図 6 の曲線 (2) のように増加するため、振れが徐々に減少していく。なお、図中の直線 (1) は研磨ベルトの切込み量と累積研削量が等しい場合を示す。さらに研削時間 t が経過し、ベルトの切込み量が 2δ となると、やがて振れの最も小さい

Fig. 4 Relation between set depth of cut of point P and cumulative depth of cut of each point

Fig. 5 Relation between set depth of cut and cumulative depth of cut at the each point of eccentric workpiece

Fig. 6 Model of the deflection-reducing process
(1) : Amount of infeed, (2) : Actual depth of cut of point P, (3) : Actual depth of cut of point Q, (4), (5) : Case of softer contact wheel, d_r : Actual depth of cut of point Q

Q 点の研削が開始され ($t=t_0$), Q 点の累積研削量は曲線 (3) のように増加する. この Q 点に研磨ベルトが接触を開始する時間 t_0 は, V_s を研磨ベルトの工作物に対する設定切込み速度とすれば $2\delta/V_s$ となる. なお, 曲線 (3) の形状は既に確認されたように曲線 (2) の形状と同じであり, 両曲線の差が研削過程における工作物の振れとなる. そして, 両曲線が接した点 ($t=t_1$) で, 振れが完全に除去される状態となる.

ベルト研削では, ゴムコンタクトホイールの弾性変形のため, 理想的な場合 ($t=t_0=2\delta/V_s$) に比べて, 振れが最も少ない Q 点の研削が必要となり, 結局, 振れが除去されるまでに t_1 の研削時間を要することになる. 弾性変形が無い場合には, 研削時間が t_0 で振れが除去されることになるため, ベルト研削は相対的に長い研削時間を要することになる. さらに, 軟らかいコンタクトホイールを使用した場合には, その弾性変形量が大きくなるため, 曲線 (4), (5) で示されるように振れを除去するまでには t_2 まで研削時間が延長され, P 点の累積研削量も T_{s2} まで増加することになる.

この形状生成モデルより, 振れの除去される過程を以下に数式化してみる. 図 1 において, 研削時間 t における P 点の研削量を $X_{\max}(t)$, Q 点の研削量を $X_{\min}(t)$ とすると共に, O' からの半径をそれぞれ $\rho_{\max}(t)$, $\rho_{\min}(t)$ とすると $\rho_{\max}(t)$, $\rho_{\min}(t)$ はそれぞれ以下の式 (2), (3) で示される.

Fig. 7 Deflection-reducing process

$$\rho_{\max}(t) = r + \delta - X_{\max}(t) \quad (2)$$

$$\rho_{\min}(t) = r - \delta - X_{\min}(t) \quad (3)$$

このため, 振れ $D_f(t)$ は以下の式 (4) となる.

$$\begin{aligned} D_f(t) &= \rho_{\max}(t) - \rho_{\min}(t) \\ &= 2\delta - X_{\max}(t) + X_{\min}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

ところで, 筆者ら¹⁾は既にゴムコンタクトホイールを使用し, 寸法誤差の無い円筒工作物に対しプランジベルト研削を行った場合における研削過程について検討を行った. その中でゴムコンタクトホイールの弾性変形量は切込み速度に比例するものと仮定し, 比例常数を C とすると, 累積研削量 T_a は以下の式 (5) で示されることを明らかにした.

$$T_a = V_s [t + C \{ \exp(-t/C) - 1 \}] \quad (5)$$

この式 (5) を使用して式 (4) を整理すると, Q 点の研削が開始される時間 ($t_0=2\delta/V_s$) の前後で式 (6), (7) のように示される.

I) $t < 2\delta/V_s$ の場合 ($X_{\min}(t)=0$)

$$D_f(t) = 2\delta - V_s \left\{ t + C \left(\exp \frac{-t}{C} - 1 \right) \right\} \quad (6)$$

II) $t \geq 2\delta/V_s$ の場合

$$D_f(t) = V_s \cdot C \left(\exp \frac{-t}{C} \right) \left(\exp \frac{2\delta}{V_s \cdot C} - 1 \right) \quad (7)$$

この式 (6), (7) により, コンタクトホイールのゴムの硬さを Hs 50 とし, 設定切込み速度を変化させた場合における研削時間 t と振れ D_f の関係を求めた例が図 7 である. なお, 図中には実験値も併記してある. 図より, 実験値と計算値がほぼ一致することから計算方法の妥当性が確認できる.

4. 振れの除去過程の検討

以上のように, 振れの除去過程の計算方法を示すと共に, その妥当性が確認できた. そこで, 切込み速度, コンタクトホイールのゴム硬さ, 及び研削開始時

Fig. 8 Effects of grinding conditions on the deflection-reducing process

Fig. 9 Effect of different amounts of deflection before grinding on the deflection-reducing process

における工作物の状態が振れの減少過程に及ぼす影響について計算を行い、ゴムコンタクトホイールを使用したベルト研削における特徴と問題点の検討を行った。

図8は設定切込み速度 V_s とコンタクトホイールのゴムの硬さが、振れの減少過程に及ぼす影響について計算を行った結果である。設定切込み速度が速くなり、ゴムの硬さが硬くなるほど短時間で振れが減少しており、実験結果も同様の傾向を示した。設定切込み速度とゴムの硬さの、影響割合を比較すると、本計算の範囲内では、振れを能率良く除去するのに設定切込み速度が大きな効果を示すことがわかる。さらに、図9は研削前における振れの量が異なる場合の計算を行ったものである。研削開始直後はゴムの弾性変形のため振れの減少は少なく、ゴムが軟らかいほど弾性変

Fig. 10 Relation between dr and deflection
 dr : Actual depth of cut of point Q

形が大きくなるため、その傾向が大となる。その後は、ほぼ研削時間に比例して振れが減少し、この減少の区間は、研削前の振れが大きいほど長くなり、コンタクトホイールの硬さごとに、ほぼ平行となる傾向を示す。そして、さらに研削時間が経過すると振れの減少割合が低下することがわかる。これは図1における振れの最も少ないQ点の研削が開始されたため、相対的に振れの減少割合が低下するものであり、研削開始時の振れの量が大きいほど、ゴムの硬さが軟らかいほど所定の振れを得るのに時間を要する。

以上のように、ベルト研削では、コンタクトホイールのゴムが弾性変形した状態で加工されるため、工作物に寸法誤差がある場合には、その誤差以上の設定切込み量を与えなければ寸法誤差を除去できない。そのため偏心円筒の場合には、最も振れの少ない部分も研削が行われる。すなわち、図1においてQ点も振れの減少に伴って研削されることになる。このQ点の研削量を半径減少量 dr として振れとの関係を調べた。図10は研削開始時の振れ 2δ を一定とし、ゴムコンタクトホイールの硬さと設定切込み速度を変化して、振れと半径減少量の関係を示したものである。設定切込み速度が速くなり、ゴムの硬さが軟らかくなるほど、一定の振れを得るためには半径減少量が大きくなり、その結果、研削量が増加することになる。これは、速い切込み速度や、軟らかいゴムの場合には、定常状態におけるゴムの弾性変形量が増加するためである。設定切込み速度を速くすれば振れは早く除去されるが、半径減少量は増大するので、単純に設定切込み速度を増加するだけの高能率には問題があるといえ

Fig. 11 Effect of different amounts of deflection before grinding on dr
 dr : Actual depth of cut of point Q

る。

さらに、図 11 は研削開始前における振れの量について、半径減少量に及ぼす影響を調べたものであり、設定切込み速度とコンタクトホイール硬さを一定として研削を行った場合を示した。研削開始時の振れ 2δ が大となるにつれて振れと半径減少量の関係は一定値に近づく。しかし、研削開始時の振れが大きいほど、一定の振れを得るためには半径減少量が大となること

5. 結 論

本研究で得られた主な結果は以下の通りである。

- (1) 変動取り代を有する工作物として、偏心した円筒に対しブランジベルト研削を行った。その結果、偏心円筒の形状生成過程は、通常の工作物の場合とほとんど変わらないことが明らかにされた。
- (2) 振れの除去過程について数値計算方法を提案すると共に、その計算結果は実験結果と良く一致することが確認された。この計算方法によりゴムコンタクトホイールを使用したベルト研削における、振れの除去過程の特徴と問題点が明らかにされた。
- (3) 偏心した円筒工作物の研削においては、切込み速度が速いほど、コンタクトホイールのゴムが硬くなるほど、能率的な振れの除去が行われる。しかしながら、切込み速度の増加は半径減少量の増加を大とする。さらに、コンタクトホイールのゴム硬さが軟らかくなるほど、研削開始時の振れの量が大きいほど半径減少量は大となる。

参 考 文 献

- 1) 樋口静一，花岡忠昭：ブランジベルト研削における研削過程と切込み制御の検討，精密工学会誌，52，5（1986）832。
- 2) 樋口静一，花岡忠昭：ベルト研削加工面に及ぼす砥粒切れ刃高さ分布と弾性変位量の影響，精密機械，51，3（1985）620。

編集後記

近年の科学技術の急速な発展に伴って、各種のデバイスおよび装置の高密度化・高精度化が多くの分野において要求されている。特に 21 世紀には加工精度 1 nm の超精密が要求されるであろうといわれているが、実際の加工や計測においてこのような超精密な精度をどのような手段で実現したらよいか、現状技術を認識してナノテクノロジー構築のための問題点を的確に把握し、前進するための道を見なければならぬ。

そこで、現在この方面で活動しておられる、本学会の「ナノテクノロジー体系化推進に関する分科会」のご協力をいただき、ナノテクノロジー構築のための哲学、ナノテクノロジー実現のためのコア技術である、加工技術、計測技術、位置決め制御技術、装置組立技術ならびに環境制御技術の現状と将来について解説していただくと共に、ナノ

テクノロジーの典型例として現在強力に推進されている、超々 LSI を支える SOR 光リソグラフィ技術の実際について解説していただいた。会員の皆様の一助になれば幸いである。

ここに、本特集にご協力いただいた前記分科会の方々にお礼申し上げます。

さて、編集委員一同、本号のような魅力あるテーマで特集を組めるよう、そして学会として公平にバランスよく片寄らないよう鋭意努力して毎号の企画を進め、只今順調に発行が進んでおります。……ところで、舞台裏をチョット。実は、企画が決定してからが、事務局が大変なのです。正式依頼、入ってこない原稿の催促、原稿の整理・校正、印刷所との連絡など。1 号終わったと思うと次の号が待っていて、休む間もなく毎月、毎月夜遅くまで。というわけで、実は会誌の発行が順調に進んでいるのは、担当して下さっている相米さんと西原さんの努力が大きいのです。感謝、感謝!! (林 巖)