研 究

高精密心なし研削のための調整砥石のツルーイング法*

——研削砥石によるツルーイング法が砥石機能と加工精度に及ぼす影響——

橋 本 福 雄** 金 井 彰*** 宮 下 政 和†

Truing Method of Regulating Wheel for High Precision Centerless Grinding
—Effect of Trued Regulating Wheel with Grinding Wheel on Regulating Wheel Function and Machining Accuracy—

Fukuo HASHIMOTO, Akira KANAI
and Masakazu MIYASHITA

For realization of high precision centerless grinding, high rigidity and high precision servo-controlled regulating wheel spindle system is newly designed. On this system truing method of regulating wheel is studied for accuracy and the followings are concluded: (1) Truing accuracy with single point diamond dresser is by far lower in roundness and profile comparing with motion accuracy of

wheel spindle and dresser feed. (2) Newly proposed truing method of regulating wheel with grinding wheel gives higher shape accuracy by one order comparing with conventional method. (3) Ground surface of regulating wheel is preferable in both friction and wear characteristics, and redressing life is much extended. (4) Ground regulating wheel excellently improves machining accuracy. For example, roundness error improves from $1.7 \mu\text{m}$ to $0.2 \mu\text{m}$ and surface roughness from $0.32 \mu\text{mR}_a$ to $0.12 \mu\text{mR}_a$ in comparison with the case of conventionally trued regulating wheel.

Key words: centerless grinding, centerless grinding machine, truing method, machining accuracy, high precision grinding.

1. 緒 言

研削加工において、加工精度、特に形状精度の向上を図るには、切込み深さの正確、微細な設定が可能で、かつ切込み深さの変動を十分抑止できることが前提となる。

心なし研削においては、切込み深さの変動は、加工基準面を与える調整砥石外周面の工作物接点における回転振れに著しく支配される。この回転振れは、調整砥石軸自身の回転振れと調整砥石成形誤差による回転振れの二つに起因する。したがって、高精密心なし研削を実現するためには、調整砥石軸の回転精度と調整砥石の成形精度の改善を図らなければならない。

そこで本論文では、油圧モータ直結のサーボ駆動方式調整砥石回転軸系を新たに設計して回転振れを $0.15 \mu\text{m}$ に抑え、この回転軸に調整砥石を取り付け、単石ダイヤモンドドレッサによってツルーイングを行った。その結果、入念なツルーイングによっても調整

砥石の成形精度が軸回転振れに比べて1けた以上低く、高精密心なし研削のためには、更に高精密な成形精度が得られる新しいツルーイング法が必要であることを明らかにした。この対策として、研削砥石による調整砥石のツルーイング法を提案し、従来の方法に比べ成形精度が約1けた向上するなどその機能を示した。更に、この新ツルーイング法による調整砥石を用いた場合、研削砥石のドレス条件は同じでも、加工真円度および仕上面粗さを著しく改善できることを明らかにした。

2. 調整砥石軸系の試作と回転振れ精度

図1に高剛性、高精度を目標として試作した調整砥石回転軸系の概略を示す。軸受はラジアル、スラストともに油を作動流体とする静圧軸受とし、軸受剛性を高めた。軸の回転駆動は油圧モータによる直結駆動とし、駆動系

Fig. 1 Construction of newly designed regulating wheel spindle system

* 原稿受付 昭和57年5月25日。昭和56年度精機学会秋季大会学術講演会(昭和56年11月3日)にて発表。

** 正会員 東京都立大学工学部(現、東京都立航空工業高等専門学校; 東京都荒川区南千住8-53-1)

*** 正会員 東京都立大学工学部(東京都世田谷区深沢2-1-1)

† 正会員 東京都立大学工学部(現、シチズン時計(株); 所沢市下富武野840)

Fig. 2 Run-out of regulating wheel spindle

から伝達されるじょう乱外力¹⁾をできるだけ小さくして回転精度の向上を図った。更に、研削負荷等による外部トルクの作用に対して定速回転を保持でき、かつ連続速度制御ができるように電気油圧サーボ系を構成させた。

図2に軸外周面を測定点として振れを測定した回転振れ波形およびこの波形をフーリエ展開した結果を示す。2山以上の振れ成分は主に軸自身の真円誤差によるものと考えられる。1山成分の軸心の振れは約 $0.15\mu\text{m}$ で、本試作機の回転精度はほぼ $0.15\mu\text{m}$ と推定される。

・試作回転軸系の主な仕様

回転振れ精度 (1山成分): $0.15\mu\text{m}$

軸受剛性 (ラジアル方向): 274 MN/m { $28\text{ kgf}/\mu\text{m}$ }

軸に作用するじょう乱外力: 49 N { 0.5 kgf } 以下

3. ツルーイング法と成形精度

試作した回転軸に調整砥石 A 150 RR を取り付け、通常行われている単石ダイヤモンドドレッサを用いたトラ

バース切削によるツルーイング法 (以下、通常のツルーイング法と略す) でツルーイングした。切込みは $a_d=20\mu\text{m}$ で2回行った後、 $a_d=0$ で3回行い、リードはほぼ $s_d=30\mu\text{m}/\text{rev}$ とした。なお、ツルーイング装置はドレッサ工具のトラバース時におけるテーブルの切込み方向の変位変動分は $1\mu\text{m}$ 以下のもので、ドレッサ工具は工作物接点から約 90° 位相が異なる垂直上部に取り付いている。図3(a)に工作物接点における調整砥石外周面の振れおよび調整砥石母線形状測定の代表例を示す。このとき、ドレッサ取付位置における調整砥石外周面の振れは $7.8\mu\text{mP-P}$ であった。通常のツルーイング法では調整砥石外周面の振れが軸の回転振れ精度の $0.15\mu\text{m}$ に比べて極めて大きく、高精密な成形精度を可能とする新しいツルーイング法が必要である。

新たなツルーイング法として、調整砥石を研削加工によってツルーイングする方法 (以下、研削ツルーイング法と略す) を試みた。ここでは心なし研削盤の研削砥石をツルーイングの工具として用い、調整砥石をプランジ研削した。研削時の周速比は 77.5 、切込み量は $a_d=0.6\mu\text{m}/\text{rev}$ とした。研削砥石のドレッシングは単石ダイヤモンドを用い、切込みを $a_d=20\mu\text{m}$ で2回行った後、 $a_d=0$ で1回行い、リードを $s_d=55\mu\text{m}/\text{rev}$ とした。なお、研削砥石のドレッシング装置は調整砥石ツルーイング装置のテーブル運動精度とほぼ同等のものである。使用した研削砥石は WA 80 KmV と GC 100 LmV であるが、以下に示す結果に両砥石間の差異は認められなかった。研削ツルーイングしたときの結果を図3(b)に示す。研

Fig. 3 Shape accuracy of regulating wheel
Measuring condition: Regulating wheel A 150 RR (dia. 235 mm, width 150 mm), Spindle speed 0.12 rps, Electric micrometer (radius of stylus 10 mm)

Fig. 4 Run-out of regulating wheel periphery shape by grinding operation

Fig. 5 Ground surface of regulating wheel

Fig. 6 Photo-micrograph of ground surface of regulating wheel

Fig. 7 Surface roughness of ground regulating wheel

削ツルーイング法により、砥石外周面の振れおよび母線形状誤差ともに通常のツルーイング法の場合に比べ1/10以下と小さくなっている。研削ツルーイング法で研削した調整砥石外周面の振れを母線方向に測定点を種々変えて測定した結果を図4に示す。外周面の振れ波形にところどころに研削時に生じたと思われるスクラッチ状の約2μmの谷が見られるが、山方向に大きな突起がほとんどないのが特徴的である。

通常のツルーイング法で切削した調整砥石表面に触れると、手に砥石粉末が付着するのに対し、研削ツルーイング法で研削した砥石表面は磨き上げられた大理石に触れたような感触で、砥石表面とは異質なものに感じられる。図5は研削された調整砥石の表面状態を示したものである。受板上の工作物が砥石表面に映っており、非常に滑らかな砥石表面であることがわかる。図6は研削された調整砥石表面の顕微鏡写真で、砥粒が結合剤とほぼ同一面内で滑らかに研削されている。

図7は研削された調整砥石の母線方向の粗さを示したもので、表面の高さが非常によくそろっている。

図8に通常のツルーイング法で入念にツルーイングした場合の調整砥石の真円度と研削ツルーイング法で研削した調整砥石の真円度を示す。研削された調整砥石の真円誤差は通常のツルーイング法の場合に比べ約1/6と小さくなっている。

以上のことから、新しく提案した調整砥石の研削ツルーイング法は通常のツルーイング法に比べ極めて高い成形精度を与え、高精密心なし研削盤の運動精度を生かす非常に効果的なツルーイング法であることが明らかになった。

4. ツルーイング法が砥石機能に及ぼす影響

4.1 摩擦特性

図9は著者らが開発した転がりすべり摩擦係数測定装置²⁾を用いて、調整砥石の摩擦係数 μ_r を測定したもの

Fig. 8 Roundness accuracy of regulating wheel

Fig. 9 Friction characteristics of regulating wheel in rolling sliding contact wear test

Fig. 10 Sliding distance and friction coefficient in rolling sliding wear test
Regulating wheel; A 150 RR, Sliding velocity; -0.2 m/s

Fig. 12 Wear characteristics of regulating wheel

Fig. 11 Rolling sliding contact wear test of regulating wheel

Condition

Regulating wheel; A 150 RR (dia. 255 mm, width 150 mm), Workpiece; SUJ-2 (H_{RC} 63, dia. 40 mm, width 40 mm), Contact load per unit width; 5 kN/m, Sliding velocity; -0.2 m/s, Lubricant; water soluble (Mag. $\times 100$)

で、すべり速度 Δv ($\Delta v = v_w - v_r$, v_w : 工作物周速度, v_r : 調整砥石周速度) を連続的に変化させた場合の Δv と μ_r の同時記録結果である。研削された調整砥石の摩擦係数 μ_r は通常のツルーイング法の場合のほぼ $1/2$ と小さい。

図 10 はすべり速度 $\Delta v = -0.2$ m/s の下でのすべり距離に対する摩擦係数 μ_r の変化過程を示したものである。通常のツルーイング法で切削した調整砥石の摩擦係数はすべり距離の増加に伴って小さくなる。一方、研削ツルーイング法で研削した砥石はすべり距離に関係なくほ

一定であり、砥石の表面性状が極めて安定している。この結果は研削された調整砥石を用いる場合には、工作物の回転を制動する摩擦力が小さいため安全作業条件³⁾に十分配慮する必要があるが、長時間の安全作業条件を保障できることを示している。

4.2 摩耗特性

図 11 は転がりすべり摩耗試験⁴⁾ 開始前と開始 60 min 後の調整砥石の母線形状を示したものである。すべり速度 Δv は -0.2 m/s と一定とした。すべり距離 720 m に対する砥石半径減少量は、通常のツルーイング法の場合は $7.3 \mu\text{m}$ であるのに対し、研削ツルーイングの場合は $0.7 \mu\text{m}$ 以下と極めて小さい。この摩耗試験結果を整理したものを図 12 に示す。通常のツルーイング法の場合、摩耗試験開始直後の摩耗が急激に進行する初期摩耗と摩耗の進行が非常に遅い定常摩耗の二つの摩耗進行形態を示す。一方、研削ツルーイング法の場合は初期摩耗が認められず、試験開始直後から定常摩耗の形態をとっており、耐摩耗性が

(a) Trued wheel with single point diamond dresser

(b) Ground wheel

Fig. 13 Contact area of regulating wheel with workpiece
Contact load per unit width; 10 kN/m

Fig. 14 Contact deformation characteristics of regulating wheel

著しく高くなっている。

調整砥石を研削ツルーイングすることにより砥石寿命が著しく延び、量産時の寸法精度の向上が期待できる。

4.3 接触変形特性

直径 40 mm の単純円筒工作物に油性インキを塗り、種々の荷重で工作物を調整砥石に押し付けた。工作物に転写された接触状態を図 13 に示す。研削された調整砥石の場合は通常のツルーイング法の場合に比べて密に接触しており、接触長さが小さい。図 14 は接触長さから接触変位を算出し、押付荷重に対して整理したものである。研削された調整砥石の接触剛性は通常のツルーイング法の場合と比較して、押付荷重 3 kN/m {3.1 kgf/cm} で約 3 倍大きい。

以上の結果は、研削された調整砥石を用いる場合、自励びり振動に対する安定研削領域が狭くなり、安定化対策⁵⁾を十分に施す必要があることを意味している。

Fig. 15 Workpiece at grinding point for ground regulating wheel

5. 成形精度と加工精度

心なし研削における工作物の加工基準面は調整砥石外周面である。したがって、工作物接点における調整砥石外周面の振れが切込み変動を支配し、この振れの大小が加工精度を支配することになる。ところで、研削加工時には図 4 に示した振れ波形の山部分の包絡線上を工作物が転動することで研削点における工作物変位を生じ、この変位が切込み変動となる。図 15 は研削された調整砥石を用い、受板と調整砥石間に工作物を置き、研削点における工作物変位を測定したもので、変位が小さいほど切込み変動が小さく、加工精度が向上すると考えられる。

図 16 に通常のツルーイング法および研削ツルーイング法によってツルーイングした調整砥石を用いて研削実験を行ったときの研削力、仕上面粗さおよび加工真円度を示す。定常研削時における研削力の変動成分は切込み変動に起因するもので、図 16 (a), (b) とともに調整砥石の回転周期に同期した研削力の変動成分が認められる。しかし、研削ツルーイング法の場合は通常のツルーイング法の場合と比べて研削力の変動成分が非常に小さい。これは研削ツルーイング法によって調整砥石の成形精度が著しく向上し、切込み変動が極めて小さくなったことを示している。この調整砥石の成形精度の向上は、研削能率 $Z = 110 \text{ mm}^3/\text{s}$ の高い加工能率のもとで、直径 30 mm の工作物の加工真円誤差が従来の $1.7 \mu\text{m}$ から $0.2 \mu\text{m}$ という高い精度をもたらすだけでなく、仕上面粗さを従来の約 1/3 に向上させる。これらの結果は、調整砥石の成形精度が加工精度を向上させる上で極めて重要で、研削ツルーイング法が高精密心なし研削加工を図る上で非常に有用であることを示している。

6. 結 言

高精密心なし研削の実現のため、高剛性・高精密サーボ駆動調整砥石回転軸系を試作した。これに調整砥石を取り付け、ツルーイング法と成形精度について検討を加

Fig. 16 Output parameters in grinding with conventionally trued regulating wheel and ground regulating wheel

Grinding condition

Grinding wheel; WA 80 KmV (dressing depth of cut $20 \mu\text{m}/\text{rev} \rightarrow 0$ cut, dressing lead $55 \mu\text{m}/\text{rev}$),
Regulating wheel; A 150 RR, Workpiece; SUJ-2 (dia. 30 mm, width 70 mm), Top angle of blade:
 30° , Center-height angle; 9° , Work speed: 2.55 rps, Metal removal rate $Z=110 \text{ mm}^3/\text{s}$ ($Z'=1.57 \text{ mm}^3/(\text{mm}\cdot\text{s})$)

え, 次のことを明らかにした.

- (1) 調整砥石の成形精度が加工精度を著しく支配する.
- (2) 単石ダイヤモンドドレッサでツルーイングした調整砥石の成形精度は, 真円度および母線形状精度のいずれにおいても心なし研削盤の運動精度に比べて著しく劣る.
- (3) 調整砥石を研削砥石で研削する研削ツルーイング法を新たに提案し, 単石ダイヤモンドドレッサによるツルーイング法の成形精度に比べて約1けた高い成形精度が得られることを明らかにした.
- (4) 研削ツルーイング法によって研削された調整砥石作業面の摩擦特性, 摩耗特性および接触変形特性を明らかにし, 従来のツルーイング法の場合に比べ, 砥石寿命が著しく長くかつ安定しており, 高精密心なし研削のために有利であることを示した. また, 安定かつ安全な作業のために配慮すべき作業条件への影響をも示した.
- (5) 調整砥石を研削ツルーイングすることにより, 研削砥石のドレス条件は同じであっても, 加工精度を著しく改善できることを示した. 例えば工作物の真

円誤差が従来の $1.7 \mu\text{m}$ から $0.2 \mu\text{m}$ に, 仕上面粗さが $0.32 \mu\text{mRa}$ から $0.12 \mu\text{mRa}$ に向上する.

最後に, 本研究を進めるにあたり, 御指導を賜った東京都立航空工業高等専門学校吉岡潤一教授に深く謝意を表します. また, 御支援, 御助言をいただいた日進機械製作所大東聖昌氏および三井研削砥石株式会社の関係各位に深く謝意を表します.

参 考 文 献

- 1) 宮下政和, 金井 彰: 高精密回転軸の駆動法, 精密機械, **45**, 10 (1979) 1177.
- 2) 橋本福雄ほか: 心なし研削における調整砥石の制動機能と摩擦特性, 昭和54年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1979) 169.
- 3) 橋本福雄, 鈴木 登, 金井 彰, 宮下政和: 心なし研削の限界加工領域と安全作業問題, 精密機械, **48**, 8 (1982) 996.
- 4) 橋本福雄ほか: 心なし研削における調整砥石の摩耗特性, 昭和56年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集 (1981) 548.
- 5) 橋本福雄ほか: 心なし研削における自励びり振動の発達機構と安定化対策 (第1報), 精密機械, **49**, 6 (1983) 715.