T/D を用いた MC 研削に関する基礎的研究*

——小径ビトリファイド CBN 砥石による研削——

喜田 義宏** 川口 格*** 崔 桓†
坪田 守人†† 垣野 義昭††† 中川 平三郎*

Study on MC Grinding with Traction Drive Accelerator
-Grinding by a Vitrified Bonded CBN Wheel of Small Diameter-

Yoshihiro Kita, Itaru Kawaguchi, Hwan Choi, Morihito Tsubota,
Yosiaki Kakino and Heizaburo Nakagawa

A problem in the grinding with a small diametric wheel by a machining center (MC) is the decrease of wheel speed. In order to solve the problem, an accelerating unit which increases the wheel speed by the traction drive mechanism is developed. In this paper, a side-cut grinding is performed with a vitrified bonded CBN wheel using the accelerating unit, and the machining error is investigated experimentally and theoretically. Main conclusions are as follows: (1)The machining error can be inferred from the model. (2)The wheel deflections by using the accelerating unit are consisted of the revolving and rotating deflections, and the latter is removed by the truing operation. (3)The increase of wheel speed by the accelerating unit has a significant effect on the increase of machining accuracy.

Key words: machining center, MC grinding, traction drive, wheel speed, side-cut grinding, accelerating unit, vitrified bonded CBN wheel, machining accuracy

1. 緒 言

近年、マシニングセンタ (MC) の精度及び機能が向上したことにより、MC での研削加工が可能となってきた。さらに多彩な NC 機能を利用すれば、従来困難であった三次元形状の研削加工を容易に行うことができる。しかしながら、三次元形状の研削加工を実際に行うためには、それに伴う多くの問題を克服しなければならない。その一つにはホイールの小径化に伴う周速度の低下があげられる。このため、MC の主軸に自動工具交換装置 (ATC) により簡単に取り付けただけで主軸回転数を 6 倍に増速することができるトラ

クションドライブ増速ユニット (T/D) が開発された。

本研究ではこの T/D を MC に取り付け、小径 CBN ホイールによる研削加工を行い、工具系の剛性及び、加工条件によって生じる加工誤差を実験的、理論的に検討した。また、T/D による主軸回転の増速が工作物の寸法精度向上に及ぼす効果を調べた。また、MC スピンドル、T/D およびホイールからなる回転軸系の振れについても検討を行った。その結果、T/D による増速効果は非常に大きく、精度向上に重要な役割を演ずることが明らかとなった。

2. 加工誤差モデル

図1は、立型 MC の主軸に ATC により T/D を取り付け付けた状態を示している。T/D の増速比 R は次式で表される。

$$R = D/d + 1 \quad (1)$$

ここで、D: 外輪内径, d: 太陽ローラ外径である。

この T/D は、トラクションオイルの油膜を介した

* 原稿受付 平成3年6月18日

** 正会員 大阪工業大学 (大阪市旭区大宮5-16-1)

*** 正会員 大阪府立大学工学部 (堺市百舌鳥梅町 4-804)

+ 大阪府立大学大学院

†† (株) 旭硝子 (横浜市鶴見区末広町1-1)

††† 正会員 京都大学工学部 (京都市左京区吉田本町)

* 正会員 鳥取大学教育学部 (鳥取市湖山町南4-101)

Fig. 1 Outline of an accelerating unit in MC

ローラの摩擦力によってトルク伝達を行うため、安定した高速回転が可能であり、歯車増速機構に比べて騒音、振動が小さい。また、T/D機構は小型、軽量化が可能であり、しかも付属ケーブルやホースが不要なので自動交換が容易である。図2に立型MCおよびT/Dから成る機械・工具系の誤差要因を示す。研削力 f (N)の作用点の変位 δ は次式で表される¹⁾。

$$\delta = \theta_m \cdot (L_{t1} + L_{t2} + L_a) + \delta_{t1} + \theta_{t1} \cdot (L_{t2} + L_a) + \delta_{t2} + \theta_{t2} \cdot L_a + \delta_a \quad (2)$$

θ_m , θ_{t1} , θ_{t2} はそれぞれコラムとT/Dの①,

Fig. 2 Error model of machine and tool

T/Dの①とT/Dの②, T/Dの②とクイル軸接合部の局所的変位による角度変位を示し、また、 δ_{t1} , δ_{t2} , δ_a はそれぞれT/Dの①, ②およびクイル軸先端の弾性変位を示している。角度変位 θ は接合部の剛性 K (N/rad)を用いて以下のように表すことができる。

$\theta_m = f / K_m$, $\theta_{t1} = f / K_{t1}$, $\theta_{t2} = f / K_{t2}$ によって式(2)は次のようになる。

$$\delta = (f / K_m) \cdot (L_{t1} + L_{t2} + L_a) + \delta_{t1} + (f / K_{t1}) \cdot (L_{t2} + L_a) + \delta_{t2} + (f / K_{t2}) \cdot L_a + \delta_a \quad (3)$$

上記の誤差要因を考慮して、MC研削を行う場合の加工誤差について考える。図3に加工モデルを示す。同図(a)のように小径砥石で研削をする場合、(b)に示すように軸は研削抵抗によってたわみ、また砥石研削部は砥石の弾性変位により ξ の切り残しを生ずると仮定する。このとき砥石面の任意の位置に生ずる力は次のように示すことができる。 X の位置に生じる砥石単位幅当たりの力を $\sigma(X)$ (N/mm)とすると、 $\sigma(X)$ は次のように示せる²⁾。

$$\sigma(X) = K_g \cdot \eta(X) + c \quad (4)$$

ただし、 K_g : 砥石単位幅当たりの研削剛性(N/mm²)、 η : 寸法生成量(mm)、 c : 砥石単位幅当たりの研削力の定数(N/mm)である。

また、砥石の弾性変位に起因する工作物の切り残し量 $\xi(X)$ は次のようになる。

$$\xi(X) = \sigma(X) / K_c = [K_g \cdot \eta(X) + c] / K_c \quad (5)$$

ただし、 K_c : 砥石単位幅当たりの接触剛性(N/mm²)。砥石切込み量 $\zeta(X)$ は除去量と変位量の和で表される。

$$\zeta(X) = \xi(X) + \eta(X) \quad (6)$$

各位置での寸法生成量 $\eta(X)$ は式(4), (5), (6)より、

$$\eta(X) = \frac{K_c}{K_c + K_g} \cdot [\zeta(X) - \frac{c}{K_c}] \quad (7)$$

となり、接触域に生じる力 F_w (N)は式(4), (7)より以下のようになる。

Fig. 3 Error model of side-cut grinding

$$F_w = \int \sigma(X) dx$$

$$= \int \frac{Kg \cdot Kc}{Kg + Kc} \cdot \left[\zeta(X) - \frac{c}{Kc} \right] dx \quad (8)$$

一方、軸たわみ量 $\delta(X)$ は、砥石作業幅の中央に集中力 $F_s(N)$ が作用したと仮定し、以下の式で近似する。

$$\delta(X) = F_s \cdot (A + B \cdot X) \quad (9)$$

ただし、 A 、 B は軸径、軸長などによって式(3)より定まる定数で本研究の場合、その値は $A = 4.96 \times 10^{-4} \text{ mm/N}$ ($L_1 = 20 \text{ mm}$)、 $A = 7.95 \times 10^{-4} \text{ mm/N}$ ($L_1 = 40 \text{ mm}$)、 $B = 5.64 \times 10^{-6} \text{ rad/N}$ である。

また、式(8)、(9)から $F_w = F_s$ となる位置を求めることによって、工作物形状が求められる。

3. 実験装置および方法

MC研削実験には立型MC（日立精機：VA35）を用い、主軸にT/Dを取り付けた。回転軸系の振れについては、出力軸を600rpmで回転させ、T/Dの振れを電気マイクロメータで測定した。また、砥石周速度や工作物の送り速度が研削剛性に及ぼす影響を調べるため、表1の示す加工条件で、研削実験を行った。実験に使用したCBNホイールはホイール径15mm、ホイール幅15mm、クイル軸長20および40mm、クイル軸径10mmであり、工作物は軸受鋼SUJ-2（焼入れ）である。

ドレッシングは、MCテーブル上に保持した単石ダイヤモンドドレッサにCBNホイールをホイール周速2.3m/s、軸方向送り速度3.3mm/sで、砥石側面に切り込む（ $5 \mu\text{m} \times 2$ 回）ことにより、各研削条件ごとに毎回行った。研削液はソリュブルタイプ水溶性研削油剤（100倍希釈液）を用いた。研削抵抗の測定は圧電式動力計

（Kistler社製）を用い、また、寸法生成量は電気マイクロメータで測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 T/Dを用いた砥石軸の回転振れ

出力軸上端から距離 h を変化させ、測定したT/Dの回転振れの例を図4に示す。本実験ではT/Dにより入力軸の回転は6倍に増速されている。このため、入力軸1回転に相当する波形の中に、出力軸6回転に相当する波形が含まれていることがわかる。入力軸1回転による公転振幅を a_1 、出力軸1回転による自転振幅と a_1 の和を a_2 として、 a_1 および a_2 の測定位置 h による変化を図5に示す。

a_1 および a_2 は h の増加に伴い増加しているが、T/D出力軸とクイル軸の接合部（ $h = 35 \text{ mm}$ ）を境に増加割合が異なっている。このことから、T/Dの振れには公転振れと自転振れが認められ、また、工具系の各接合部では角度誤差が存在することがわかる。

次に、ホイール面上での振れについて検討した結果を図6に示す。T/Dにホイールを取り付けた時のホイール面の振れは約 $50 \mu\text{m}$ （図6(a)）であるが、単石ダイヤモンドドレッサで、累積量 $70 \mu\text{m}$ ツルーイングした後の振れは $5 \mu\text{m}$ （図6(b)）となった。これは、図5の $h = 80 \text{ mm}$ における公転振幅 a_1 と一致する。このことから、ツルーイングによって自転による振れは除去されたと判断できる。

4.2 静剛性について

静剛性の大小が研削結果に及ぼす影響を明らかにす

Table 1 Experimental conditions

Grinding machine	VA35+T/D
Wheel	BN230G100V3
Work	SUJ-2
Quill length	20, 40mm
Revolution speed	11000, 22000, 32000, 43000rpm
Wheel speed	8.3, 16.7, 25.0, 33.3m/s
Feed speed	1.7, 3.3, 5.0, 6.7mm/s
Depth of cut	10, 20, 30 μm
Grinding method	Side-cut, Upcut, Wet

Fig. 4 Measured examples of deflection

Fig. 5 Deflection versus quill position

るため、クイル長が異なる砥石を用いた。静荷重は砥石中央部に作用させ、その時の力を動力計で測定した。一方、機械・工具系の変位はクイル先端（図7のA点）、T/Dの①、②先端（図7のC、B点）の3点の変位を電気マイクロメータで測定した。図7に静剛性実験の結果を示す。式(3)によれば、機械・工具系の変位と各測定点の変位との間には以下の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} & \text{A点の変位} - \text{B点の変位} \\ &= (f/K_m + f/K_{t1} + f/K_{t2}) \cdot L_q + \delta_{t1} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \text{B点の変位} - \text{C点の変位} \\ &= (f/K_m + f/K_{t1}) \cdot L_{t2} + \delta_{t2} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \text{C点の変位} \\ &= (f/K_m) \cdot L_{t1} + \delta_{t1} \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)より、T/Dの①の部分の弾性変位 δ_{t1} を仮定すれば、C点の変位を用いてコラムとT/Dの①の接合部の剛性 K_m が推定できる。同様に式(11)よりT/Dの①とT/Dの②の接合部の剛性 K_{t1} が推定され、また、T/Dの②とクイル軸の接合部の剛性 K_{t2} が推定できる。計算に必要な数値は以下のようにした。た

Fig. 6 Effect of truing on the wheel deflection

Fig. 7 Relation between static load and tool displacement

だし、 δ_{t1} は微量なので、ここでは無視する。

$L_{t1}=140\text{mm}$ $L_{t2}=80\text{mm}$ $L_q=20, 40\text{mm}$ $D_q=10\text{mm}$

$$D_{t2}=26\text{mm} \quad E_{t2}=E_{t1}=2.2 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

こうして求めた接合部の剛性は以下ようになった。

$$K_{n1}=1.21 \times 10^5 \text{ (N/rad)} \quad K_{t1}=2.83 \times 10^5 \text{ (N/rad)}$$

$$K_{t2}=1.29 \times 10^5 \text{ (N/rad)}$$

4. 3 研削剛性について

研削剛性は砥石周速度や工作物の送り速度あるいは砥石の種類やその表面状態などの研削加工条件によって変化するものである。本実験での研削剛性を求めるために、表1に示す研削条件でホイール周速度を変化させて実験を行い、砥石単位幅当たりの法線研削抵抗と実切込み量の関係を調べた。その結果を図8に示す。同図より砥石単位幅当たりの法線研削抵抗は、実切込み量の増加に伴って直線的に増加しており、また、ホイール周速度が増加すると研削抵抗は減少していることがわかる。各条件について砥石単位幅当たりの研削剛性を図中の直線の傾きより求めれば、ホイール周速度 8.3, 16.7, 25.0, 33.3m/s に対して、それぞれ 83, 43, 26, 21N/mm² が得られる。

このようにして求めた砥石単位幅当たりの研削剛性の速度比（テーブル速度 V_w / ホイール周速度 V_s ）に対する変化を図9に示す。この結果より砥石単位幅当たりの研削剛性は、速度比に比例して増加していることがわかる。この場合の研削剛性は次のような実験式となった。

Fig. 8 Relation between normal force and actual depth of cut

Fig. 9 Relation between grinding stiffness and speed ratio

$$K_g = 2.1 \times 10^5 (V_w / V_s) \text{ N/mm}^2$$

4. 4 法線研削抵抗および寸法生成量について

各条件で研削を行った場合の研削抵抗および、寸法生成量をそれぞれ図10、図11に示す。また、2章のモデルに従って解析した値も同図（実線）に示す。

同図よりホイール周速度の増加に伴い法線研削抵抗が減少し、寸法生成量は増加していることがわかった。このことから、 T/D による主軸増速効果が加工誤差を減少させるのに非常に有効であることが判明した。また、実験値と計算値は比較的良好一致を示しており、モデルの妥当性が確かめられた。

5. 結 言

自動工具交換（ATC）が可能なトラクションドライブ増速ユニット（ T/D ）をMCに取り付け、小径CBNホイールによる研削加工を行い、工具系の剛性及び、加工条件によって生じる加工誤差について、実験的、理論的に考察を行った。また、MCスピンドル、 T/D およびホイールからなる回転軸系の振れについて検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 各々の研削条件に対する工作物の加工誤差

Fig. 10 Relation between normal force and wheel speed

Fig. 11 Relation between actual depth of cut and wheel speed

の値はモデル化して作成した式から推定することができる。

- (2) T/D を用いた砥石軸の振れには公転振れと自転振れが認められるが、後者はツルーイングによって除去できる。
- (3) 小径砥石による研削剛性は速度比に比例して増大する。
- (4) 小径砥石を用いることが多いMC研削において、主軸回転を増速することは、加工精度向上に対して非常に有効である。特に、小径砥石で低剛性の場合にはその効果が著しい。

最後に、本研究を行うに当たり実験機器などで御協力を頂いた日立精機(株)、KOYO-SHOWA精機(株)、大阪ダイヤモンド工業(株)の各社に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 白瀬敬一, 稲村豊四郎, 安井武司: エンドミル加工における加工誤差の推定と要因分析, 精密工学会誌, 53, 9(1987)1433.
- 2) R. S. Hahn: On the Analysis of Random Errors in Precision Grinding Operations, Trans. ASME, Ser. B, 83, (1961)131.