マイクロ超音波・電解ハイブリッド 内面加工装置の開発*

Ultrasonically-Assisted Electrolytic Internal Grinding System

小林 敏**

高橋征幸**

立花 亨**

厨川常元***

嶋田慶太***

Satoshi KOBAYASHI, Masayuki TAKAHASHI, Toru TACHIBANA, Tsunemoto KURIYAGAWA and Keita SHIMADA

Key words internal grinding, ultrasonic grinding, electrolytic grinding, high aspect ratio process

1. はじめに

内面研削において、加工内周面の小径化には、必然的に砥石の小径化が伴う。加工能率を維持するため、砥石の小径化に対して、これまでは回転速度を高めることで対応してきた。しかし回転速度の増加は、砥石クイルの振れ回りを大きくして加工精度の劣化を招き、さらにスピンドルベアリングの寿命を短くする。したがって、内周面の小径化に対して、これまで以上の高精度・高能率加工を進めていくためには、砥粒の運動エネルギーのみに依存した従来の研削技術だけでは限界がある。

そこで、超音波振動援用研削装置を製作して小径内周面の研削を試み、その効果を検証した。さらに、超音波振動に加えて、電解作用も併せて小径砥石に援用する超音波電解研削システムに発展させ、より研削抵抗を下げて砥石クイルのたわみを最小限にし、小径内周面研削のさらなる高精度・高能率化を試みるべく、図 1 に示すマイクロ超音波・電解ハイブリッド内面加工装置を開発した¹⁾。

2. 内面研削用超音波スピンドルの開発

従来の研削において加工面の表面粗さを向上させるためには、一般的に、砥粒サイズを小さくするか、ドレッシング工程に時間を掛け、砥石表面の凹凸を小さく成形して加工する。しかし同時に、砥石の材料除去能力の低下から加工時に砥石クイルがたわみ、形状精度、とくに円筒度の劣化を招く。加工時間を一定にした条件では、表面粗さと円筒度はトレードオフの関係にある。しかも、内面研削盤による量産ラインに多い表面粗さ $1\mu\text{m Rz}$ 以下の要求レベルでは、その関係はより顕著に現れている。

砥石の回転運動に超音波振動を伝搬させることで、研削抵抗が低下することは、以前より知られていた。さらに加工面の表面粗さに変化をもたらすことも、筆者らは平面ブ

ランジ研削の超音波援用による研削面改善の効果を表す式についてすでに提案し²⁾、そのメカニズムを捉えていた。そこで、図 2 に示す超音波援用内面研削における、研削面改善の効果を表す理論式を構築し、内面研削において研削抵抗を下げ、同時に表面粗さの改善効果が得られるような内面研削用超音波スピンドルの開発に取り組んだ。以下は既存の超音波スピンドルと比較して内面研削に特化させるための開発コンセプトである。

外観

装置レイアウト

図 1 マイクロ超音波・電解ハイブリッド内面加工装置

*原稿受付 平成 25 年 11 月 20 日

**ミクロン精密株式会社（山形市蔵王上野 578-2）

***東北大学大学院工学研究科（仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01）

図2 超音波援用内面研削の模式図

図3 超音波援用による表面粗さの改善効果

- (1) スピンドルのラジアル剛性の強化
ベアリングから砥石までの距離を短縮し、ラジアル方向の研削抵抗に対してなるべく砥石クイルをたわませない構造にした。ベアリングには複列アンギュラボールベアリングを用い、長時間使用しても高い回転精度を保つこと。
- (2) 超音波振動の振幅拡大
1 μm Rz 以下の表面粗さ、最終目標 0.2 μm Rz を得るため、理論解析によって得られた振幅条件、10 μm_{p-p} 以上、周波数 40 kHz となるような振幅拡大ホーンに設定すること。
- (3) 最高回転速度の設定
砥石回転速度と研削抵抗の関係を調べ、超音波振動を援用することで、従来の 150000 min⁻¹ の高周波スピンドルの加工能率を上回ることをめざし、超音波振動子を内蔵したタイプとしてはハイレベルの最高回転速度 50000 min⁻¹ にすること。
- (4) 使いやすさの向上

図4 切削機構および研削機構のすくい角

図5 外周面研削および内周面研削における切込み角

生産ラインでの稼働率向上を考慮し、M1.6のねじによる砥石の締結を可能とし、かつ、超音波振動の熱損失を最小限にして伝搬させること。また超音波振動子への給電部は非接触式とし、カーボンブラシの交換等のメンテナンス作業の省力化を図ること。

試作した超音波スピンドルを自社製内面研削盤に搭載して、SCM435（硬度 50HRC）、アルミ合金 A5052P（硬度 40HRC）の内面研削を試みた。結果は研削抵抗を約 25% 低下させ、かつ理論³⁾通り図3に示すように表面粗さの改善効果を確認した。

3. 内面研削における超音波振動援用効果

研削加工のメカニズムを考察すると、刃先のすくい角や、工具と材料の接触圧から、図4に示すように切削加工をする刃先が一つのバイト工具に対し、研削加工をする多数の砥粒切れ刃は負のすくい角を有しており材料表面上滑りしやすいことが直観的に理解できる。さらに図5に示す外周面の研削に対して、内周面の研削加工は、材料表面に対して砥粒の切込み角が小さいため、さらに上滑りしやすい加工条件となる。加えて砥石クイルが細くなり、たわみやすくなれば、その傾向はより顕著となる。いくら砥石を材料に強く押し付けても、砥石の摩耗が進行するだけで、加工効率はほとんど変化しない。

しかし、回転砥石に超音波振動を援用することで、砥粒の材料への切込み角が微視的に観察すると変化することがわかる。従来研削では砥粒の切込方向は常に一定であり砥粒痕に倣うように砥粒が同じ軌跡をトレースする。その

図6 研削による材料除去のメカニズム

図7 超音波援用研削面

際、砥粒は材料表面をある範囲で弾性変形させたあと研削加工に移ることが知られている（図6参照）。一方、砥石に超音波振動を伝搬することで砥粒は砥石外周面上でサイン波状に移動し、図7に示すようにサイン波状の砥粒痕が交差する加工表面を創成する。砥粒は砥粒痕と交差する際の材料への切込み角は大きくなり、研削を開始しやすい条件になる。そして、その後砥粒痕と交差するところで研削が終了することが推測できる。それは従来研削の切屑が図8のように紐状になるのに対し、超音波振動援用研削の切屑は小さく薄片状となることから推察できる。

小径工作物の細い穴の奥から切屑を排出するには、切屑が小さいほど有利であり、砥石の目詰まりもしにくい。

図9はアルミ合金 A5052P（硬度 40 HRC）をフィードバック制御機能付動力計を用いて 7 N の一定圧で内径 4.4 mm の内周面を直径で 50 μm 加工した場合のデータである。超音波振動の援用効果が、加工能率として最も顕著となった加工例の一つである。

図8 超音波援用による切屑形状の変化

図9 定圧研削による超音波援用効果

図9 定圧研削による超音波援用効果

4. 電解研削への超音波振動援用効果

図10は電解研削の模式図である。工作物を陽極、砥石を陰極にして、その間に電解液を満たし、電圧を印加し金属材料の工作物を溶解させながら研削する加工法である。電解作用は工具と工作物が非接触の状態でも起きるため、加工抵抗を極限まで下げることが可能であり、さらに材料の硬さの影響を受けない。砥粒は材料を除去加工する工具兼、電極間のスペーサとなる。これまで電解研削を扱った文献⁴⁾⁵⁾では一様に電極間範囲は 0.02 mm 以上と記されている。これ以上電極を近づけると短絡の確率が高まり、加工効率も加工表面の品質も安定しないことが原因のようだ。砥粒の 1/2 が砥石母材のメタル部に埋まっていると考えると、砥粒サイズ 0.04 mm、粒度にすると #400 の砥石が安定した電解研削の限界と考えられる。しかし、筆者らが目標としている表面粗さ 0.2 μm Rz を得るにはより微細な砥粒が必要となる。

例えば、砥粒サイズ約 10 μm、粒度 #2000 の電着砥石を使用して電解研削を行うと短絡し、電解反応は起こらない。その状況で砥石に超音波振動を伝搬すると電極間の電気抵抗が、1 Ω 以下から 1~2 kΩ へ変化し、電極間の電位差が上昇し始め、電解反応を起こすことができた。しかし加工中は、電極間に幾度となくスパークが発生し、図11に示すように加工表面に多数の放電痕が生成された。スパ

図 10 電解研削の模式図

図 12 超音波電解内面研削面

図 11 放電痕のある超音波電解研削面

ークを発生しない電圧レベルに下げると電解反応は停止する。そこで高周波パルス電源を用いてスパークを発生させない閾値となる電流値に設定し、電圧と duty 比を調整したところ、高電圧、低 duty 比で放電痕を生成させない安定した電解研削が起ることを確認した。そこで電解研削専用に改良した電源を製作し、粒度 #2000 の砥石でも安定した電解研削を可能とした。

図 12 は、粒度 #2000 の電着砥石を用いた超音波電解研削面である。0.150 μmRz の表面粗さが得られている。

5. 超音波電解研削による高アスペクト比内周面の加工

図 13 は外径 0.5 mm、長さ 10 mm の砥石を使用して内径 0.8 mm、長さ 8 mm の貫通穴の内周面を超音波電解研削をしている様子である。工作物奥側から研削液兼電解液を供給して、電解反応で発生した泡が工作物手前側から噴出している。

この小径砥石ではクイルが 1 N 程度で折損することから、0.7 N の研削抵抗で SCM435（硬度 50 HRC）アスペクト比 10 の内周面を加工した。従来研削では、加工面に砥粒痕もつかないが、超音波振動の援用により表面の凸部を研削除去する程度の加工能力が現れた。電解研削では材料の除去効率は大幅に増加するが、加工面の高精度な真直度は得られなかった。そこで超音波振動と電解作用を重畳した超音波電解研削により、アスペクト比 10 の内周面を

図 13 外径 0.5 mm 砥石による超音波電解研削

図 14 超音波電解研削の効果

効率よく、高い形状精度に加工することが可能となった。その効果を図 14 に加工面の表面粗さ（断面曲線）で示す。

6. 超音波振動と電解反応の相乗効果

図 15 に示す砥石は、電解研削用の砥石として製作した CBN 砥石（φ4）である。CBN 層に斜溝を設け、軸の超硬合金を溝底で露出させ電極にする。短絡が発生しない電極間距離を確保できるため、砥粒サイズに関わらず安定した電解研削が可能である。

図 15 超音波電解研削用砥石

この斜溝付 CBN 砥石と電極間距離の短い電着砥石を用いて、同じ内面研削のサイクルにより従来研削、超音波振動援用研削、電解研削、超音波電解研削の 4 種類の加工を行った。従来研削の除去量を基準にして超音波振動の援用による増加量 A を、電解作用の援用による増加量 B 、そしてその両方の援用による増加量 C を比較したところ、電極間距離の長い CBN 砥石の方は、 $A+B>C$ となるのに対して、電極間距離の短い電着砥石では $A+B<C$ となる結果が得られている。

超音波振動を伝搬した砥石が液中で発生させるキャビテーションをルミノール溶液の化学発光によりその分布を観察したところ、超音波振動する砥石に隣接する物体を近づけるほど、その隙間のキャビテーション分布が密になることを確認した。したがって電極間が狭いほど、キャビテーションによる洗浄効果が高まり、電極表面を活性化させていると考える。つまり、超音波振動援用研削と電解研削のハイブリッド化は加工効率の面からも相乗効果をもたらしているようだ。

7. お わ り に

超音波振動を砥石に伝搬することで、従来の研削、そして電解研削においてもその加工点に起きる現象にさまざまな変化をもたらすことが分かってきた。そのため、従来の内面研削では加工困難な内周面を、高精度・高能率に加工することを可能とした。

本研究を通じて筆者らは、いくつかの感動を覚えるような実験結果を得ている。その感動をより多くの人に伝えられるよう、加工条件のさらなる最適化、各装置の耐久性の向上、製作コストの低減を行いながら、実用化への取り組みを進めていく予定である。

参 考 文 献

- 1) S. Kobayashi, K. Shimada, C. Murakoshi, K. Koike, M. Takahashi, T. Tachibana and T. Kuriyagawa: International Journal of Automation Technology, **7**, 6 (2013) 654-662.

- 2) K. Shimada, T. Zhou, J. Yan and T. Kuriyagawa: Statistical Approach for Calculating Ground Surface Roughness of Ultrasonicassisted Grinding, Journal of the Japan Society for Abrasive Technology, **56**, 11 (2012) 752-757.
- 3) K. Shimada, P.J. Liew, T. Zhou, J. Yan and T. Kuriyagawa: Statistical Approach Optimizing Slant Feed Grinding, Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing, **6**, 6 (2012) 898-907.
- 4) 佐藤健児: 特集 5 電解研削の理論と応用, 機械工作, **12**, 83 (1965) 31.
- 5) 河村末久, 矢野章成, 樋口誠宏, 杉田忠彰: 研削加工と砥粒加工, 共立出版, (1984) 136.

小林 敏

1990 年山形大学理学部数学科卒業。現在、ミクロン精密(株)技術部技術開発課課長。

高橋征幸

1988 年山形大学工学部機械工学科卒業。現在、ミクロン精密(株)設計部次長。

立花 亨

1980 年宇都宮大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。1980 年ミクロン精密(株)入社。1997 年東北大学大学院工学研究科精密工学専攻博士課程修了。現在、ミクロン精密(株)技術部技術開発課参与。

厨川常元

1984 年東北大学助手。1990 年同大学講師。1991 年 University of Connecticut, Visiting Professor。1992 年東北大学助教授。2003 年東北大学教授。現在、東北大学大学院工学研究科機械システムデザイン工学専攻教授。

嶋田慶太

2009 年東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻博士課程前期 2 年の課程修了。2012 年東北大学大学院工学研究科機械システムデザイン工学専攻博士課程後期 3 年の課程修了。2012 年東北大学大学院工学研究科機械システムデザイン工学専攻助教を経て現在に至る。