

超音波振動援用型アーバ式内面研削スピンドルの開発

安達 和彦

大久保 元博（大久保精工株式会社）

各種産業機械の円筒形状部品に対する内面研削加工に超音波振動援用することで従来の加工精度を超える高精度の加工を実現する次世代の内面研削スピンドルの開発を目的とした。平成 29 年度は超音波振動援用の技術調査を行い、内面研削スピンドルに適用可能な方式の検討を行った。

1. はじめに

各種産業機械の円筒形状部品に対する内面研削加工では、穴の内径 D に対する穴の深さ L の比 (L/D) が部品毎に相違する。結果として加工ニーズに合わせた様々な L/D を有する内面研削スピンドルの実用化が必要になると考えられる。特に工作機械では、加工能率と加工精度のさらなる向上の観点から主軸の高速化と低振動化が重要な技術課題となり、今後、例えば図 1 に示すような断面形状を有する中空主軸の回転振れの大幅な低減が求められる。中空主軸では熱処理によって中空部内面が変形しかつ残存することにより、内径表面の形状に由来した質量アンバランスが生じる。従来の内面研削スピンドル（回転突き出し部の L/D が 5 以下の短尺内面研削スピンドル）では、長尺の中空主軸に対して一度に内面全体に高精度な研削加工が施せない場合が生じる。JIS B0905-1992¹⁾ で規定された「つり合い良さ」を有する中空の長尺高速回転軸を製造する際、設計仕様で指定された「つり合い良さ」の程度が高い場合、一度に内面全体に研削加工が施せないことによって残存する質量アンバランスが原因で、設計仕様の「つり合い良さ」を満足できない状況が想定される。長尺内面研削スピンドルは中空の高速回転主軸の質量アンバランス低減を実現するためのキーデバイスの一つと位置付けられる。本研究課題では、研究代表者が関わってきた共同研究者との長尺内面研削スピンドル（例えば、図 2 : $L/D=14.38$ ）開発の発展的展開を目指し、超音波振動援用することで従来の内面研削加工精度を超える高精度の加工を実現する次世代の内面研削スピンドルの開発を目的とする。

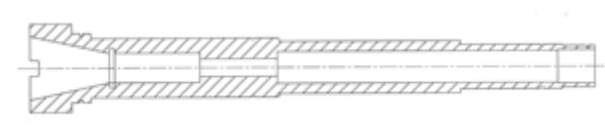


図 1 長尺の中空高速回転軸の例（工作機械主軸を想定）²⁾

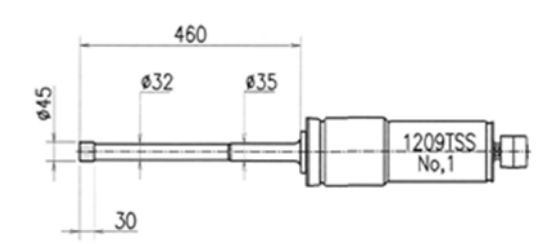


図 2 $L/D=14.38$ の長尺内面研削スピンドル²⁾

2. 従来技術としての超長尺内面研削スピンドルの加工精度

研究代表者と共同研究者はこれまでに曲げ1次の危険速度より高い回転速度で運転する内面研削スピンドルの開発に取り組み、回転突き出し部の形状設計法を考案し³⁾、 $L/D = 15$ の長尺内面研削スピンドルを試作して第1報⁴⁾にて振動特性の解析結果と空転時の実測結果を報告した。その後、一連の研究の第5報⁵⁾および第6報²⁾において、現実的な深穴加工物を想定して新たに $L/D = 14.38$ の長尺内面研削スピンドルを試作し、試研削時の加工条件および加工後の内面の真円度と表面粗さについて報告した。そこでは、長尺内面研削スピンドルによる小径深穴加工物の内面研削が実現可能であることを実証し、長尺の中空高速回転軸の質量アンバランス低減技術の確立に向けた基礎的な加工技術が整備できた。続く第6報では、 $L/D = 14.38$ の長尺内面研削スピンドルを用いた小径深穴加工物の内面研削時の振動特性を打撃試験により計測した。その結果、長尺内面研削スピンドルによる小径深穴加工物の内面研削加工では、スピンドル回転停止時および空転時と比較して、研削時の振動特性が異なることが確認できた。第7報⁶⁾では、第6報と同様に $L/D = 14.38$ の長尺内面研削スピンドルによる小径深穴加工物の内面研削加工を試行し、スパークアウト研削時に打撃試験を行い、スパークアウト研削時のスピンドルの振動挙動の評価とスパークアウト研削後の加工内面の幾何特性の評価を行った。その結果、長尺内面研削スピンドルによる小径深穴加工物の内面研削加工では、水平方向（切り込み方向）の伝達関数ではスピンドルの曲げ1次危険速度近傍でゲインが極大化する共振特性が粗研（砥石切り込み量 0.02mm 一定）および精研（スパークアウト研削）において認められないことが実験的に検証できた。また、長尺内面研削スピンドルによる内面研削加工の幾何特性は従来の一般的な内面研削スピンドル（回転突き出し部の L/D が5以下の短尺内面研削スピンドル）による内面研削加工の幾何公差と同等とみなせる評価基準で概ね評価できることが確認できた。以上、第7報を含む一連の研究により、長尺内面研削スピンドルによる小径深穴加工物の内面研削が実現可能であることが実証でき、中空の長尺高速回転軸の質量アンバランス低減技術の中核となる基礎的な加工技術が確立できた。

本研究課題では、研究代表者と共同研究者がこれまでに取り組んできた長尺内面研削スピンドルの一連の開発の発展的展開を目指し、超音波振動援用することで従来の内面研削加工精度を超える高精度の加工を実現する次世代の内面研削スピンドルの開発を目的とする。

3. 内面研削スピンドルへの超音波振動援用

3.1 超音波振動援用による加工

超音波振動援用した加工は1950年代まで遡り、切削加工および研削加工に適用されてきた⁷⁾。したがって、超音波振動援用した加工は技術的には半世紀を超えるものとなっているが、超音波振動デバイスの高性能化と低廉化による汎用品としての普及と加工対象の拡大から、今なお研究開発が精力的に進められている。例えば、2016年度砥粒加工学会学術講演会では、脆性材料のドリル加工⁸⁾や研削⁹⁾に関する研究が発表されている。本研究課題で対象とする内面の加工に対する応用としては水谷らのホーニング加工への適用が挙げられる¹⁰⁻¹¹⁾。また、超音波振動援用した加工についての教科書も出版されている¹²⁾。

3.2 超音波振動援用型アーバ式内面研削スピンドル

共同研究者らが開発してきた超長尺の内面研削スピンドルはスピンドルが一体で構成されていた。

超音波振動援用の技術調査の結果、以下の技術的ポイントがあることが分かった。

- ・超音波振動子は径方向と軸方向の振動が生じるが、径方向振動の腹（最大振幅）の位置で軸方向振動が節（振動零）となること。
- ・既存の超音波振動援用の加工工具では、超音波振動子の径方向振動の腹の位置で主軸と結合する構造となっていること。
- ・上記構造により、超音波振動子の駆動下において長時間の運転が可能出ることが実証されていること。
- ・様々な寸法（直径）の超音波振動子が市販で低コストに調達できること。
- ・市販の超音波振動子では、径方向振動の腹の位置に取り付け用のフランジが装備されていること。

以上の調査から、本研究課題では、アーバ式の内面研削スピンドルに市販の超音波振動子を組み込むことにより、交換可能で低コストの超音波振動援用の内面研削スピンドルが開発可能となる。

4. おわりに

本研究課題では各種産業機械の円筒形状部品に対する内面研削加工に超音波振動援用することで従来の加工精度を超える高精度の加工を実現する次世代の内面研削スピンドルの開発を目的とし、平成 29 年度は超音波振動援用の技術調査を行い、内面研削スピンドルに適用可能な方式の検討を行い、開発の見通しを得た。

参考文献

- 1) JIS B 0905-1992, 回転機械 - 剛性ロータの釣合い良さ, (1992).
- 2) 安達和彦, 大久保信雄, 大久保元博, 向井良平, 高橋宏美, 長尺内面研削スピンドルの開発に関する研究, 第 6 報: 小径深穴加工物の試研削時の振動解析, 2016 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2016)講演論文集, A05, (2016), pp.13-16.
- 3) スピンドルユニット, 特許第 5699290 号, (2015).
- 4) 安達和彦, 田中純也, 大久保元博, 長尺内面研削スピンドルの開発に関する研究, 第 1 報: スピンドル軸形状設計と振動特性, 2010 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2010)講演論文集, A42, (2010), pp.73-78.
- 5) 安達和彦, 大久保元博, 長尺内面研削スピンドルの開発に関する研究, 第 5 報: 小径深穴加工物の試研削, 2015 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2015)講演論文集, A27, (2015), pp.62-65.
- 6) 安達和彦, 大久保信雄, 大久保元博, 向井良平, 高橋宏美, 長尺内面研削スピンドルの開発に関する研究, 第 7 報: 加工時の振動挙動と加工内面の幾何特性の評価, 2017 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2017)講演論文集, D34, (2017), pp.313-317.
- 7) 岳 義弘, 超音波加工装置による超音波加工作用について, 2017 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2017)講演論文集, A11, (2017), pp.29-30.
- 8) 米山 陽, 石黒輝雄, 佐野正明, 清水 毅, 超音波振動を援用した小径ドリル加工, 第 2 報: ドリル食いつき時の切削抵抗挙動について, 2016 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2016)講演論文集, B17, (2016), pp.138-139.
- 9) 米谷宇人, 今井健一郎, 超音波振動を援用したアルミナセラミックスの延性モード研削加工,

2016 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2016)講演論文集, A20, (2016), pp.144-145.

- 10) 水谷秀行, 超音波振動援用によるホーニング加工面の表面性状, 2016 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2016)講演論文集, B23, (2016), pp.157-158.
- 11) 渡邊友貴, 水谷秀行, 大江裕之, 浜田晴司, セラミックスのホーニング仕上げ面性状に及ぼす超音波振動の影響, 2017 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2017)講演論文集, A02, (2017), pp.3-4.
- 12) 磯部浩己・原 圭祐, 超音波振動加工技術 ～装置設計の基礎から応用～, 科学情報出版, (2017), 178p.