◇ 砥粒加工学会技術賞　紹介記事 ◇

「単一軸型」長尺内面研削用スピンドルユニットの開発と実用化

Development and commercial products of "single shaft type" internal grinding spindle with a length-to-diameter ratio

大久保元博[*1]，大久保信雄[*1]，安達和彦[*2]，向井良平[*3]，高橋宏美[*3]
Motohiro OHKUBO[*1], Nobuo OHKUBO[*1], Kazuhiko ADACHI[*2], Ryohei MUKAI[*3], Hiromi TAKAHASHI[*3]

Key words : internal grinding, spindle, vibration analysis, vibration testing, roundness, surface roughness

1. はじめに

近年の研削に関する技術は，ユーザーのニーズに応える形で，自動車，航空機，造船，建設機械等向けの超大型化と，精密金型や電子部品等向けの超微細化という異なる方向への進化が求められている．このような状況のなかで大久保精工では，内面研削加工における大型化のニーズに対応するべく，「単一軸型」内面研削用スピンドルユニットの開発を推進している．

今回，当社が開発し，平成 28 年度砥粒加工学会技術賞を受賞した「単一軸型長尺内面研削スピンドルユニット」（以下，本スピンドルと称す）を紹介する．

2. 設計思想と製品展開

当社は 1965 年創業で滋賀県草津市に所在する，工作機械や専用加工機用のスピンドル（**図 1**）を設計・製作する会社である．工作機械メーカーが量産しない特殊仕様品や要求仕様が厳しいもの等に関して，専門性を有する当社が起用されることが多い．それゆえ当社製品には，特殊なニーズに対応した特殊設計製作品が多い．

全製品に共通する思想は，①経験に裏打ちされた独自性あふれる設計ノウハウ，②自社製スピンドルを搭載した工作機械による高精度な寸法創成技術，③振動工学に基づいた高度な動的回転バランス均衡化技術，④スピンドル全体を調和させる精緻な組み立て技術，があり，これらをつよみとしている．

そのなかで内面研削スピンドルは，他の用途のそれよりも高速回転かつ高剛性が求められる．そもそも当社では，内面研削用にも長年の経験と多くの実績があり，高速回転と高剛性の両面を高い次元で両立することを実現してきた．現行の仕様では，**図 2** に示すアーバ交換型のスピンドルではモールステーパ No.1 から No.5 までの各接続規格におけるシリーズを定番化しており，グリース潤滑方式において最高 50,000min^{-1} までの回転速度をカバーしている．

図 1　内面研削スピンドルとアーバ群

図 2　アーバ交換型スピンドル

3. 長尺内研スピンドル開発の経緯

3. 1　内面研削加工における現場のニーズ

一般的に内研加工の現場では，加工物の内径および深さに最適なスピンドルとホイールアーバ（クイル）を選択して用いるので，ストレート部分の長さ（L）と外径（ϕD）はバリエーションが多い程良い．具体的には，工作機械のスピンドルシャフトや芯押台，航空機の降着装置，建設機械のブッシュ，削岩機のシリンダ等の各部品加工はそれぞれ所定の寸法があるため，場合によっては細長い仕様のクイルが求められる．しかしクイルの設計・製作の観点では，L と D の比率（L/D 比）には一定の制限があり，これを超えると危険とされてきた．

そのなかで当社は独自の手法として，クイル交換式では無く，スピンドルシャフト自体を突出させる方式を採用し，これを「単一軸型」と命名し，複数の特許を取得して，他製品との差別化を図っている．**図 3** に単一軸型スピンドルの例を示す．

3. 2　長尺スピンドルの特徴と新規性

他製品は、回転しない支持筒で回転軸を支持する構造（支持筒型）である．この場合，回転軸の直径は砥石よりも小径で，支持筒よりも小径に成らざるを得ないため，しなりやすく剛性が低い．その結果，加工精度および加工能率が低くなり，加工時間は長くなる等のデメリットが生じる．製作の面では，回転軸を小径化することには限界があり，小径加工に対応でき

*1　大久保精工株式会社：〒525-0055　滋賀県草津市野路町683-2
*2　中部大学：〒487-8501　愛知県春日井市松本町1200
*3　株式会社豊幸：〒444-0113　愛知県額田郡幸田町菱池江尻1-3
〈学会受付日：2016年12月26日〉

図 3　単一軸型内面研削スピンドルユニット

ない欠点がある.

これに対して「単一軸型」は，回転軸の直径を砥石の外径近くまで太くできることから高剛性とできる．回転軸は，必要に応じて鍛造加工によりニヤネットシェイプまで鍛錬することで，結晶粒子を細密化し鍛流線を埋設する．また動的バランスを追及することおよび独自性を盛り込んだ内部設計にすることにより，高品位で使いやすい製品を実現化している．

図 4 に当社の「単一軸型」スピンドルの構造と、他製品である「支持筒型」スピンドルの構造を比較して示す．

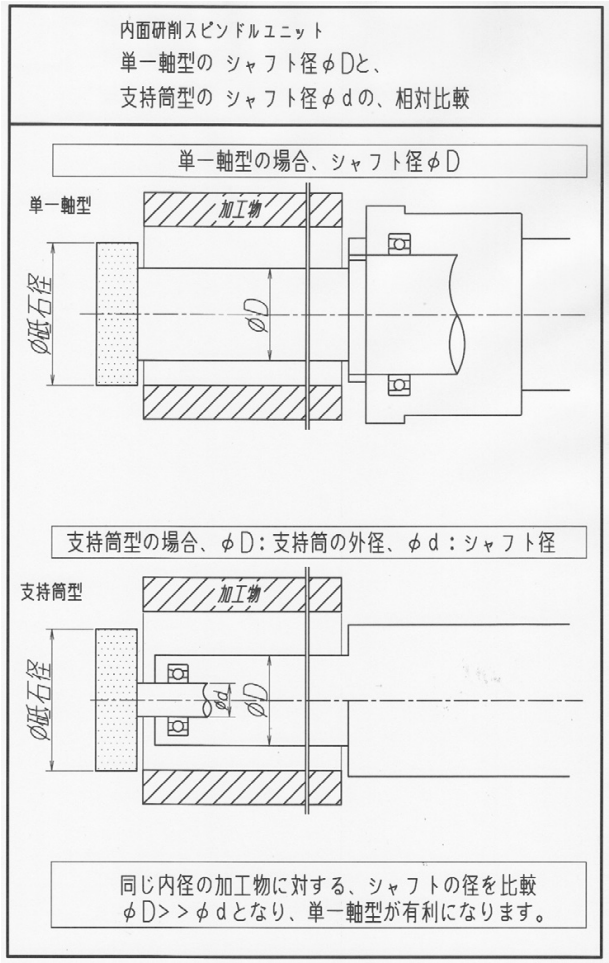


図 4 「単一軸型」と「支持筒型」スピンドルユニットの比較

3．3　市場ニーズにこたえて

単一軸型に関して従来，軸突出部長さが 300mm までの製品群（図 3）を商品化しており，2008 年に開催された第 24 回日本工作機械見本市（JIMTOF 2008）では，研削盤メーカーの出展機上で展示されるなどして広く訴求してきた．この結果，小径でかつ深穴の加工物に対する長尺スピンドル開発のニーズが顕在化して，また複数の具体的な開発要望を受け，軸突出長さ 300mm を超えて 600mm までの開発および実用化の取組を開始した．**図 5** に軸突出部長さが 600 mm の単一軸型長尺内面研削スピンドルユニットの開発品を示す．

図 5　単一軸型長尺内面研削スピンドル

3．4　スピンドルの振動設計と振動特性

スピンドルの動的振れ回りすなわち振動の観点から内面研削スピンドルの設計の考え方について整理すると，加工時のスピンドル回転速度とスピンドルの危険速度の関係から以下の二通りに大別される．一つ目の設計法は，**図 6** に示すように曲げ1次の危険速度よりも低い回転数で運転して研削加工を行うという剛性設計の考え方に基づいてスピンドルを設計するものである．深穴の内面研削加工ニーズに対応してスピンドルの長尺化を進めると，曲げ1次の危険速度が低下するため最高運転回転数を下げざるを得なくなり，結果として加工能率を高くすることが困難になると考えられる．一方，二つ目の設計法は，振動設計の考え方に基づき，**図 7** に示すように加工時のスピンドル回転速度がスピンドルの曲げ 1 次の危険速度と曲げ 2 次の危険速度の間に位置するようにスピンドルを設計するものである．図 4 に示した軸突出部長さが 600 mm の単一軸型長尺内面研削スピンドルユニット開発品はこの二つ目の設計法に基づく設計である．

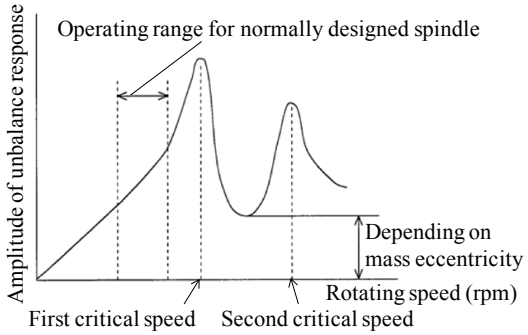


図 6　スピンドル設計：剛性設計　の概念図

次に単一軸型長尺内面研削スピンドルの回転停止時，空転時および研削時の 3 条件に対して打撃試験 3), 4)によって

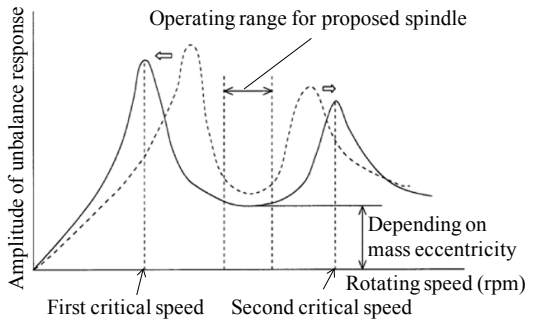


図 7　スピンドル設計：振動設計　の概念図

それぞれ測定した切り込み方向のコンプライアンス伝達関数とコヒーレンスの一例を**図 8** に示す．スピンドルの諸元は，回転突き出し部の長さ L = 460 mm（砥石長さ 30mm を含む），同直径 D = 32mm で，L/D = 14.38 となり，外観概略を**図 8** に示す．スピンドルのオーバーハング部には，根元側に外径 35mm の拡径部を有する．

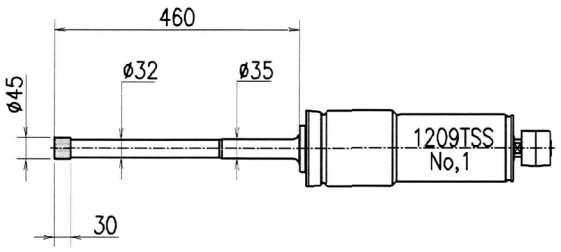


図 8　L/D = 14.38 の長尺内面研削スピンドル

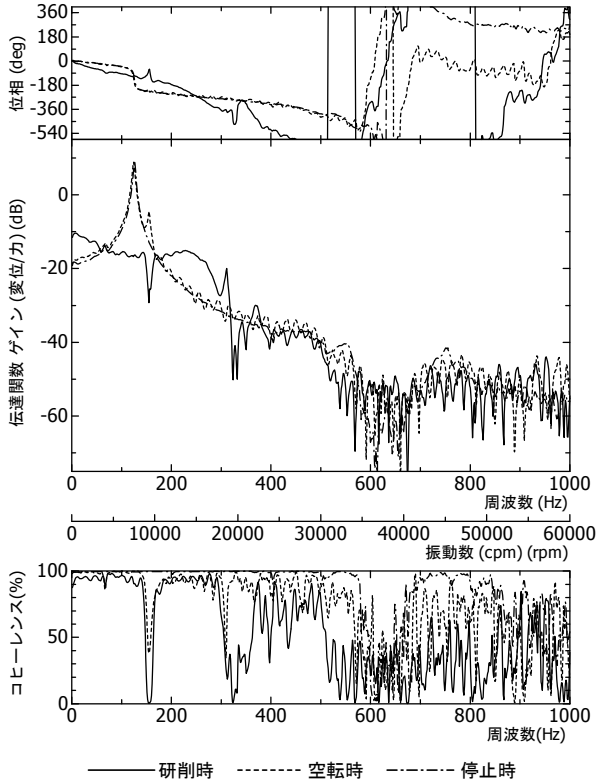


図 9　切り込み方向の振動特性

切り込み方向の伝達関数については，停止時は約 570Hz まで，空転時と研削時はスピンドル回転速度である 150Hz (9,000rpm) 近傍を除いて約 300Hz までの範囲でそれぞれ測定できたと考えられる．スピンドルの回転停止時と空転時のコンプライアンス伝達関数のゲインと位相の関係から，スピンドルの曲げ 1 次固有振動数（危険速度 [5]）は約 125Hz（約 7,500rpm）と同定した．研削時の伝達関数のゲインが回転停止時および空転時に比べて低下していることから，研削による付加的な振動低減効果（減衰効果）が生じていると考えられる．特に図 8 に示す切り込み方向の伝達関数については，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研削時に認められないので，研削による付加的な振動低減効果（減衰効果）が考えられる．図 8 に示す切り込み方向の伝達関数は，砥石切り込み量を一定（0.02mm）として測定したので，今後，切り込み量をパラメータにした水平方向の伝達関数の測定を行い，接触弧長さに比例する減衰効果 [6]（研削粘性 [7]）との関連を調べる．

3．6　スピンドルの疲労寿命評価

長尺内面研削スピンドルの強度上の信頼性の観点から疲労寿命評価を行った．具体的には，L = 600mmおよびφD = 40mm 仕様の単一軸型長尺内面研削スピンドルを対象に寿命について，当社から立命館大学理工学部機械工学科教授酒井達雄工学博士（現名誉教授）に委託し寿命評価を行った．その結果，疲労限度を基礎とした耐久設計の立場からの評価として『危険部位の曲げ応力は，スピンドル材料の疲労限度より著しく低く，安全率を6とした場合でも疲労破壊は発生しないと判断さる』との評価を得た．また『修正マイナー則による評価として，疲労寿命は219年（使用条件：8時間/日x300日/年，うち60％研削加工＋残る40％空転）』とされ，極めて安全な設計になっているとの評価を得た．

3．7　試加工内面の表面性状

内面研削加工対象のテストピースは SCM415 材（硬度：HRC 58～60）で，**図 10** に形状を示す．内面研削後の真円度（外径および内径）は図 10 に示す測定位置：測定①，②，③，内径表面粗さは図 10 に示す測定位置：測定④，⑤，でそれぞれ評価した [4]．

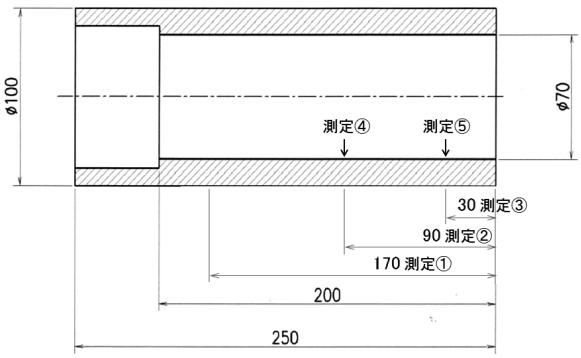


図 10　内面研削加工対象のテストピース（単位：mm）

内面研削加工後に計測した幾何公差については，**表 1** に真円度，**表 2** に内径表面粗さ，**表 3** に外径表面粗さをそれぞれ示す．今回の内面研削加工面では，内径真円度 1.10～

表 1 真円度

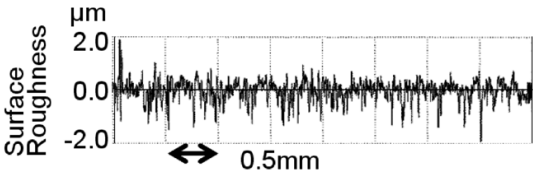
測定箇所 / 幾何公差		測定①	測定②	測定③
外径真円度	○	0.82μm	0.89μm	0.89μm
内径真円度	○	1.39μm	1.37μm	1.10μm
同心度	◎	0.60μm	0.36μm	0.50μm

表 2 内径表面粗さ

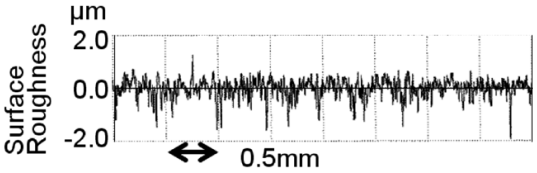
測定箇所		測定④	測定⑤
内径表面粗さ(測定 1)	Ra	0.25μm	0.28μm
内径表面粗さ(測定 2)	Ra	0.26μm	ー

表 3 外径表面粗さ

測定箇所		測定①	測定②	測定③
外径表面粗さ	Ra	0.46μm	0.34μm	0.35μm



(a) 内径表面粗さ, 測定位置:測定④



(b) 内径表面粗さ, 測定位置:測定⑤

図 11　内面研削加工後の加工物の内面表面粗さ計測データの一例(測定装置:小坂研究所 サーフコーダ SE1700)

1.39 μm および内径表面粗さ Ra 値 0.25～0.28 μm であった. **図 11** に内径表面粗さ計測データの一例を示す. 内面研削加工面の幾何公差の評価基準例として研削盤メーカー各社のカタログ等を参照して, 内径真円度 1.0μm, 内径表面粗さ Ra 値 0.2μm をそれぞれ想定すると, 今回の加工では内径真円度および内径表面粗さ Ra 値は概ね評価基準に近い値であった. 2015 年度に報告 [8]した内面研削加工後の内径真円度は 0.85～1.10μm, 内径表面粗さ Ra 値は 0.13～0.18μm であった. したがって, 昨年度の報告 [8]と同様に, 長尺内面研削スピンドルによる内面研削加工の幾何公差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分かった. 加工物の n 数を今後さらに増やすとともに研削条件の最適化を図ることで, 想定した評価基準を満足できるものと考えられる.

4. 検証に用いた内面研削盤に関して

本開発と実用化に向けた評価装置には, 長尺のスピンドルと, 同じく長尺で円筒形状の加工物を搭載して, 高精度に内面研削加工できる仕様が求められるなか, 株式会社ジェイテクト製特型内面研削盤(型式:GE4P-150)(図 12)を用いた.

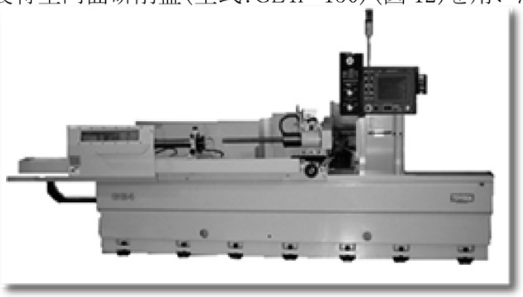


図 12　特型内面研削盤(型式:GE4P-150)

本機は, トラバーステーブルを長くすることにより深穴研削に最適な送りを実現している(図13). また特別仕様として, 自動研削サイクル中に適宜割り込みドレスができる仕様になっている. これにより, 砥石の目詰まり等に起因する研削ムラや微振動などの研削中に起こりうる問題を, 適宜砥石を修正することにより改善できる.

5. おわりに

当社は, オンリーワンの「ブレない回転軸」を「最高品質を追及する方へ」ご提供することを旨としていて, 手前味噌ではあるが, 多くのユーザーから好評を得ている.

小径長尺深穴の内面研削は, 文字通り奥が深くともすれば敬遠されがちであるが, この度頂いた技術賞を励みに, 「単一軸型」スピンドルを広く普及させて, 砥粒加工の世界に貢献するべく微力ながら努めたい.

6. 謝辞

本開発と実用化にあたっては, 滋賀県中小企業団体中央会「平成 21 年度ものづくり中小企業製品開発等支援補助金(試作開発等支援事業)」および「平成 22 年度草津市産学連携スタートアップ事業」(草津市, 立命館大学)のご支援をいただいた. また, 近畿経済産業局「地域産業資源活用事業計画に関わる認定」(平成 22 年 9 月)および近畿経済産業局「関西ものづくり新撰 2013」(平成 24 年 12 月 17 日)の認定を受けた. ここに記して謝意を表する.

7. 参考文献

1) スピンドルユニット, 特許第 5261696 号, (2013).
2) スピンドルユニット, 特許第 5699290 号, (2015).
3) 長松明男: モード解析入門, コロナ社, (1993) .
4) 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 6 報:小径深穴加工物の試研削時の振動解析, 2015 年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2016)講演論文集, A05, (2016) 13.
5) R.Gasch and H.Pfutzner, 三輪修三 訳: 回転体の力学, 森北出版, (1978).
6) 李 和樹: 工作機械の剛性と精度(3), 砥粒加工学会誌, 42, 12 (1998) 510.
7) 奥山繁樹, 李 和樹: 第 33 回グラインディング・アカデミー研削加工の基礎 –基礎から最新技術まで-, 砥粒加工学会, (2016).
8) 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) 62.