

工作機械用高性能高速主軸製造技術開発

安達 和彦

大久保 元博（大久保精工株式会社）

本研究課題では、動バランス性能に優れた工作機械用高性能高速主軸の製造技術を確立することを目的とする。2019年度は、工作機械主軸を想定したテストピースの製造工程における動バランス性能の変遷を詳細に分析し、最終工程として内面研削工程を導入することによる動バランス性能の改善効果を定量評価した。さらに、評価結果に基づいて内面研削盤に搭載可能なスピンドルの設計・試作を行った。

1. はじめに

工作機械の加工能率と加工精度のさらなる向上の観点から、主軸の回転速度の増大と回転振れの低減が昨今の重要な技術課題となり、中空の工作機械主軸では高速回転時の回転振れを低減することが求められている。回転振れに対する評価基準として国際規格 ISO 21940-11 2016（文献 1、国内対応規格 JIS B0905-1992（文献 2））で規定された「釣合い良さの等級」が適用される。主軸製造工程中の熱処理で主軸の内面および外面が変形するが、外面については熱処理後の外面研削の工程で要求寸法に対して許容加工精度にて仕上げられる。一方、内面については、後工程の内面研削によって中空部内面の幾何公差をどのように設定できるかによって、熱処理で生じた内面形状に由来する質量アンバランスが異なることが指摘できる。工作機械主軸の設計仕様で指定される「釣合い良さの等級」が例えば G2.5 や G1 の高い等級で、かつ、主軸中空部の L/D （主軸内径 D に対する内面研削深さ L の比）が 5 を超える長尺の中空主軸では、内面研削深さ L の部分を一度に研削加工が施せない場合が生じる。その結果、内面に残存する質量アンバランスが原因で、設計仕様の「釣合い良さの等級」を満足できない状況が生じることが想定される。このような状況において、超長尺内面研削スピンドル（大久保精工株式会社）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キーデバイスの一つと位置付けられる。

本研究課題では、超長尺内面研削スピンドルを用いた中空部内面研削加工に基づく動バランス性能に優れた工作機械用高性能高速主軸の製造技術を確立することを目的とする。

2019年度は、工作機械主軸を想定したテストピースの製造工程（切削工程、熱処理工程、外面研削工程、内面研削工程）における動バランス性能の変遷を詳細に分析し、最終工程として内面研削工程を導入することによる動バランス性能の改善効果を定量評価する。さらに、評価結果に基づいて内面研削盤に搭載可能なスピンドルの設計・試作を行う。

2. テストピースの製造工程における動バランス性能の変遷

2.1 テストピースの内面研削加工

動バランス性能の変遷を分析したテストピースの内面研削には、超長尺内面研削スピンドル 1208TSS（大久保精工株式会社）を用いた。スピンドルは回転突き出し部（オーバーハング部）の長さ $L = 630$ mm（砥石幅 30mm を含む）、同直径 $D = 40$ mm で、 $L/D = 15.75$ で、図 1 に外観概略を示す。テストピースは SCM415 材（硬度：HRC 58~60）で重量が約 16.5 kg の中空形状で、

全長 730 mm, 内径 50 mm, 大径側と小径側の外径がそれぞれ 85 mm と 70 mm で, 図 2 に概略図を示す. スピンドルは, 図 3 に示す CNC 汎用円筒研削盤 特 GE4P-150II (株式会社ジェイテクト) に搭載し, テストピースは大径側を主軸にチャッキングし, 小径側の端面から 80 mm の位置で三点振れ止めにより支持した. テストピースの小径側の端面から 600 mm 深さまで内径 50 mm の内面を研削した. 表 1 に研削条件を示す.

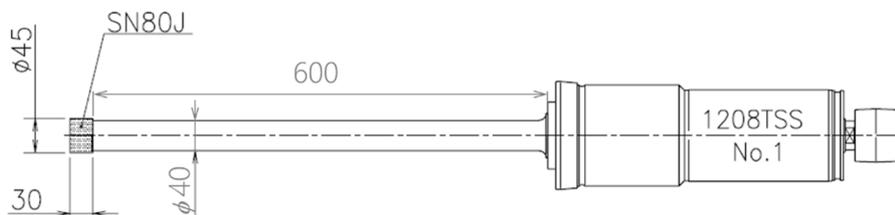


図 1 長尺内面研削スピンドル 1208TSS ($L/D = 15.75$, 砥石幅 30mm を含む) (単位 : mm)

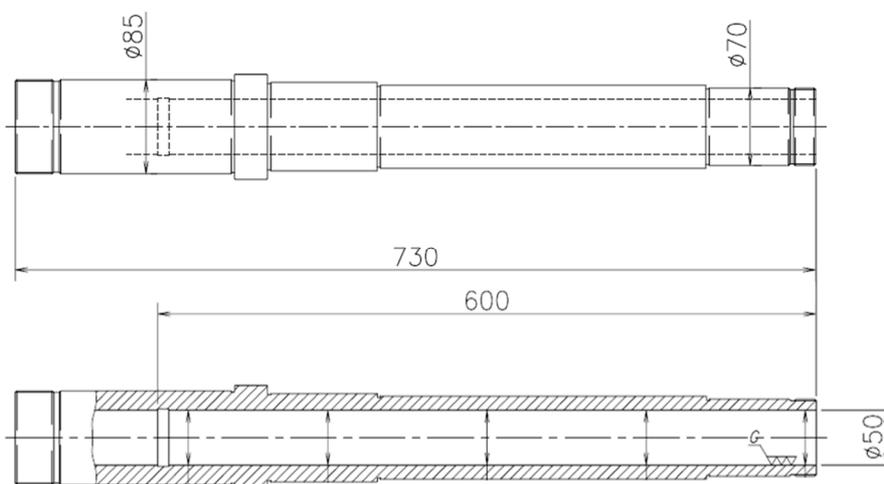


図 2 テストピース (単位 : mm)



図 3 長尺内面研削スピンドルの外観 (株式会社ジェイテクト製 CNC 汎用円筒研削盤 特 GE4P-150II に搭載)

表 1 研削条件

砥石 : SN80J (砥粒 SA)
砥石径 : 45 mm
砥石回転速度 : 7,000 min ⁻¹
砥石周速 : 16.5 m/s
トラバース速度 : 1,000 mm/min
加工物回転速度 : 130 rpm

2.2 テストピースの真円度測定

テストピースの内径真円度および外径真円度は、図 4 に示すように大径側の端面から 35 mm の位置①を始点として同端面から 720 mm の位置⑭まで 14 箇所の位置で測定した。真円度の測定は株式会社 豊幸 殿のご協力により、同社品質保証部が保有する Talyrond 440 (Taylor Hobson) で測定した。

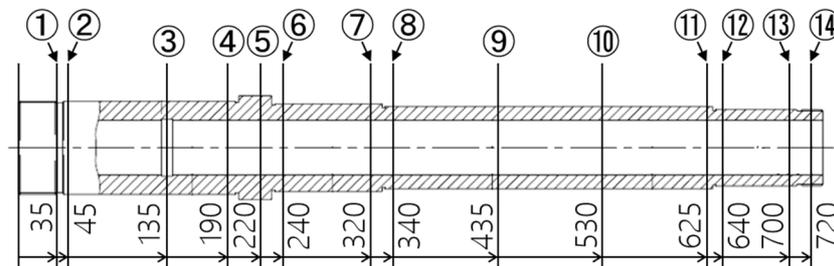
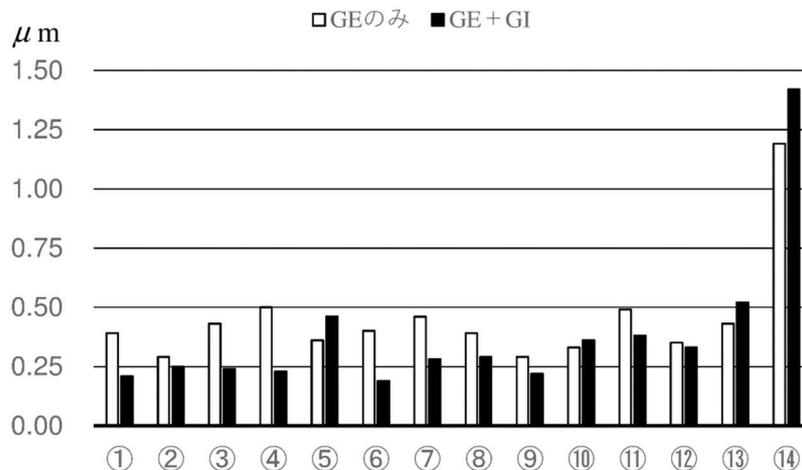
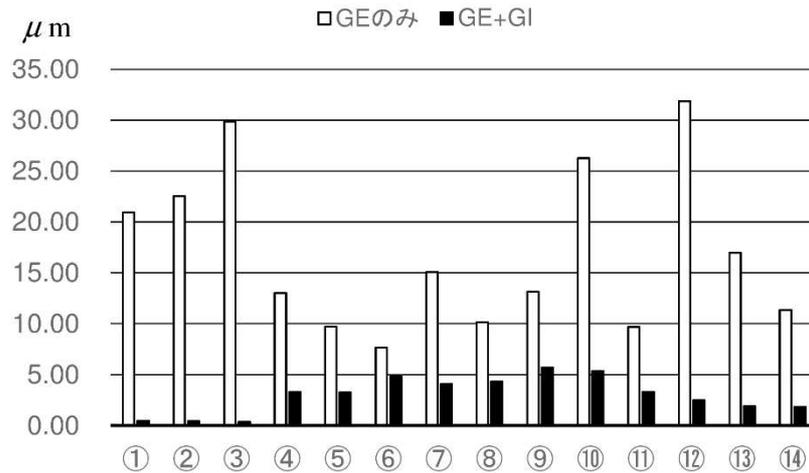


図 4 テストピースの外径・内径真円度測定位置 (単位 : mm)

テストピースの内径真円度および外径真円度を以下に示す。外面研削のみ (GE のみ) 行ったテストピースと外面研削および内面研削 (GE+GI) を行ったテストピースでの外径真円度、内径真円度および外面粗度を測定した結果を図 5 の (a) と (b) に示す。図 5 中の①から⑭は、図 4 で示したテストピース上の 14 カ所の測定位置に対応する。



(a) 外径真円度



(b) 内径真円度

図5 テストピースの幾何特性の比較 (□外面研削のみ, ■外面研削+内面研削, テストピース上の位置①~⑭)

2.3 テストピースの動バランス測定

テストピースの各製造工程 (切削工程, 熱処理工程, 外面研削工程, 内面研削工程) において, 動バランス性能がどのように変遷したかを定量評価するために, 切削工程後, 熱処理工程を経て外面研削工程後, および内面研削工程後の計 3 回, テストピースの残留不釣り合い (質量アンバランス) を測定した. テストピースは図 6 に示すように釣り合い試験機 NAGAHAMA-SCHENCK H20B (株式会社長浜製作所) に搭載し, 大径側の端面から 120 mm の位置 (軸受 A) と小径側の端面から 80 mm の位置 (軸受 B) で支持した. テストピースの中央部にベルト掛けして 1,800 min⁻¹ で回転させて低速バランスの範囲で, 図 7 に示すテストピースの大径側の支点から中央部側 100 mm の位置 (修正面 I) と, 小径側の支点から中央部側 140 mm の位置 (修正面 II) において残留不釣り合い (単位: g・mm) を測定した. 測定結果を表 2 に示す.



図6 釣り合い試験機 (株式会社長浜製作所製 NAGAHAMA-SCHENCK H20B) に搭載したテストピースの外観

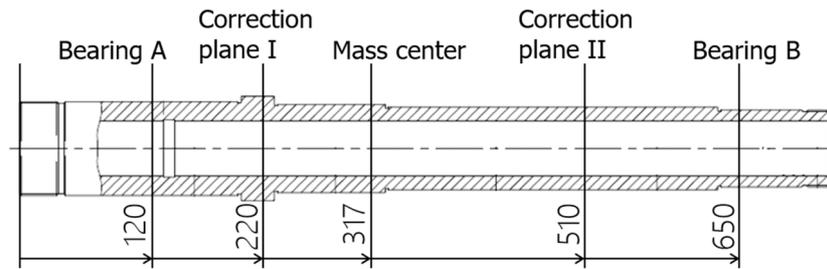


図7 テストピースの支点と修正面の位置 (単位 : mm)

表2 各製造工程における残留不釣合い測定結果

工程	残留不釣合い (単位 : g・mm)		
	修正面 I	修正面 II	総不釣合い
切削 (旋削) L	10	10	20
熱処理	—	—	—
外面研削 GEのみ	70	35	105
外面・内面研削 GE+GI	3.5	16	19.5

2.4 製造工程における動バランス性能の変遷についての考察

表2に示すテストピースの残留不釣合い測定結果を各製造工程と対応させると、切削工程後の残留不釣合いは大径側と小径側でそれぞれ $10 \text{ g} \cdot \text{mm}$ であったが、熱処理工程を経た外面研削工程後には大径側で $70 \text{ g} \cdot \text{mm}$ 、小径側で $35 \text{ g} \cdot \text{mm}$ と大幅に増加した。その後、内面研削工程を経ることで、大径側の残留不釣合いが $3.5 \text{ g} \cdot \text{mm}$ に、小径側の残留不釣合いが $16 \text{ g} \cdot \text{mm}$ にそれぞれ減少した。このことから、熱処理で主軸の内面および外面が変形し、外面については熱処理後の外面研削工程で要求寸法に対して許容加工精度内に仕上げても、内面形状に由来する質量アンバランスが残るために残留不釣合いが大幅に増加すると考えられる。図5(a)より外径真円度については、外面研削のみ (GEのみ) 行ったテストピースと外面研削および内面研削 (GE+GI) を行ったテストピースで同等の値となっている。しかし、内径真円度については、外面研削および内面研削 (GE+GI) を行ったテストピースの内径真円度に比べて、外面研削のみ (GEのみ) 行ったテストピースの内径真円度が明らかに低下していることが図5(b)から指摘できる。真円度の測定結果が残留不釣合いの測定結果と整合することから、テストピースの残留不釣合いは、内面形状に由来する質量アンバランスに起因すると結論できる。

修正面が二つの剛体ロータの釣合わせについて、JIS B0905-1992 (文献2)の「5. 許容残留不釣合いの各修正面への配分」で規定されている配分方法を援用することで、表2に示した今回のテストピースの測定結果について、大径側と小径側の残留不釣合いの和がテストピース全体の残留不釣合いであると仮定した。この仮定に基づいて大径側と小径側の残留不釣合いの和を「テストピースの残留不釣合い」とみなして表2の右端の欄に「総不釣合い」として示した。テストピースは工作機械の高速主軸を想定するので、ISO 21940-11 2016 (文献1)の「Table 1・Guidance for balance

quality grades for rotors with rigid behaviour」(JIS B0905-1992 (文献 2) の「参考付表 1 各種回転機械に関して推奨される釣合い良さの等級」) によると釣合い良さの等級は G2.5 となる。工作機械主軸の回転数を N rpm として、普通型として $N = 10,000$ rpm を、高速型として $N = 20,000$ rpm を想定する。テストピースの重量が 16.5 kg であることから、文献 3 を参照して釣合い良さの等級 G2.5 の主軸に許容される残留不釣合い (許容残留不釣合い U_{per}) を普通型 $N = 10,000$ rpm と高速型 $N = 20,000$ rpm の回転数に対して計算し、表 2 の右端の欄に示した「テストピースの総不釣合い」と併せて図 8 に示す。図 8 から、外面研削のみ (GE のみ) 行ったテストピースでは、普通型 $N = 10,000$ rpm での許容残留不釣合い $39.4 \text{ g} \cdot \text{mm}$ をはるかに上回る残留不釣合い ($105 \text{ g} \cdot \text{mm}$) があることになるので、釣合い良さの等級 G2.5 を達成するために、別途、後工程として剛体釣合わせの工程が必須となる。一方、外面研削および内面研削 (GE+GI) を行ったテストピースでは、高速型 $N = 20,000$ rpm での許容残留不釣合い $19.6 \text{ g} \cdot \text{mm}$ と同じ残留不釣合い ($19.5 \text{ g} \cdot \text{mm}$) となることから、剛体釣合わせの工程を経ることなく釣合い良さの等級 G2.5 が達成できる。

以上、工作機械主軸を想定したテストピースの各製造工程における動バランス性能の変遷を詳細に分析し、最終工程として内面研削工程を導入することによる動バランス性能改善効果を定量評価した。

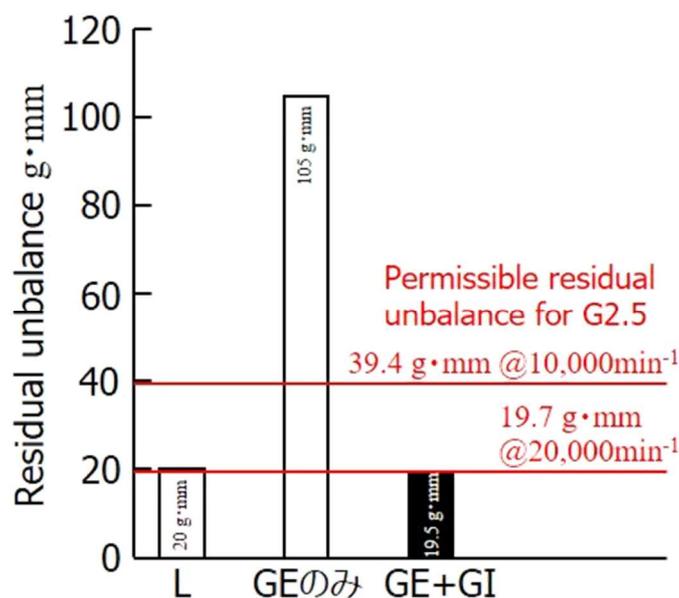


図 8 テストピースの残留不釣合いと釣合い良さの等級 G2.5 に対する許容残留不釣合い (回転数 10,000rpm および 20,000rpm) の比較

3. スピンドルの設計・試作

前章では工作機械主軸を想定したテストピースの各製造工程における動バランス性能の変遷を評価したので、評価結果に基づいて内面研削盤に搭載可能なスピンドルの設計・試作を行った。

実機に搭載することを想定しかつ製作可能な軸形状として、図 9 に設計したスピンドルの概略を示す。なお、設計したスピンドルが開発品であることから図 9 において形状の詳細は示していない。

前章でのテストピースの各製造工程における動バランス性能評価は、1本のテストピースに対する評価であった。実際の製造工程を想定すると、同一の設計図に対して複数のスピンドルが製造さ

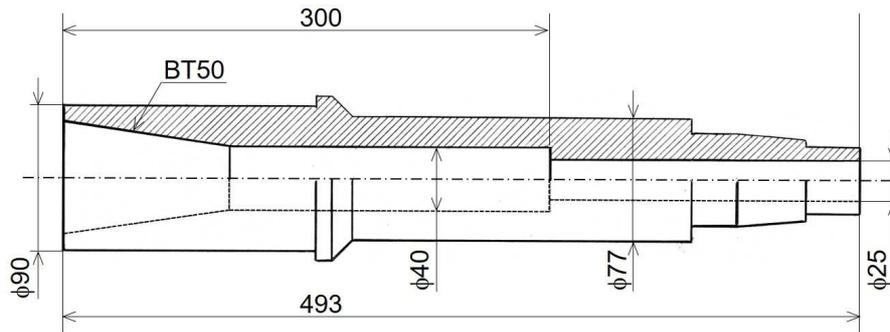


図9 スピンドルの概略図（単位：mm）

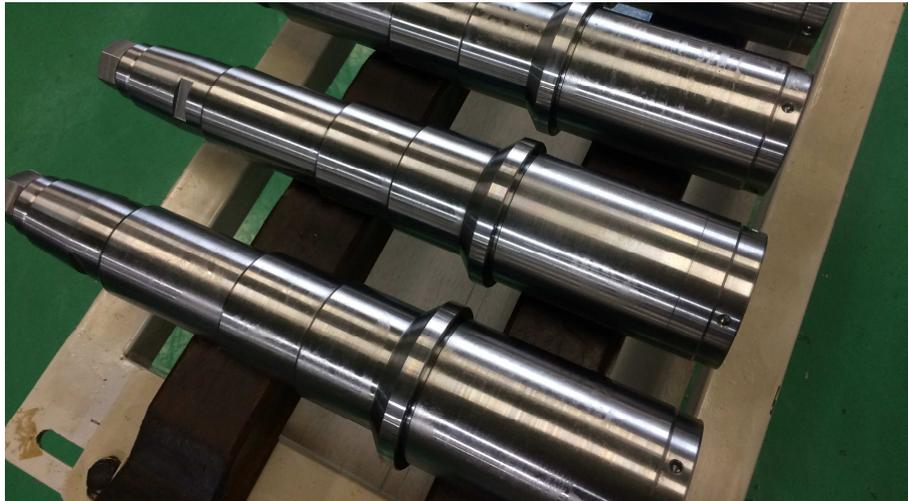


図10 試作スピンドル外観

れると考えると、複数のスピンドルでの真円度のバラツキと動バランス性能のバラツキの両者を把握した統計的なデータ分析が必須と考えられる。そこで、設計したスピンドルは4本を実際に試作することとした。図10に試作中のスピンドルの外観を示す。

今後、試作中の4本のスピンドルについて、各製造工程において逐次測定した真円度と残留不釣合いを統計的に分析する。さらに最終工程である内面研削をどのように実施するかを工作機械メーカーと連携して検討することにより、製造コストと動バランス性能の両面でベストとなるような最終工程を実現する。本研究課題の推進により、主軸製造工程での適切な内面研削の導入により製造コストを抑えた工作機械用高性能高速主軸製造技術を確立し、日本製工作機械の更なる高性能化に寄与することで、我が国のものづくり基盤の強化に貢献できると考えられる。

4. おわりに

本研究課題では動バランス性能に優れた工作機械用高性能高速主軸の製造技術を確立することを目的とし、2019年度は工作機械主軸を想定したテストピースの製造工程における動バランス性能の変遷を詳細に分析し、最終工程として内面研削工程を導入することによる動バランス性能の改善効果を定量評価し、工作機械用高性能高速主軸製造技術を確立できる見通しを得た。さらに、評価結果に基づいて内面研削盤に搭載可能なスピンドルの設計・試作を行った。

参考文献

- 1) ISO 21940-11:2016, Mechanical vibration - Rotor balancing - Part 11: Procedures and tolerances for rotors with rigid behavior, (2016).
- 2) JIS B 0905-1992, 回転機械 - 剛性ロータの釣合い良さ, (1992).
- 3) 松下修己, 田中正人, 神吉 博, 小林正生, 回転機械の振動 実用的振動解析の基礎, コロナ社, (2009), pp.91-96.