

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年度後半に新たに内面研削盤に搭載可能なスピンドルシャフトを設計し、4本を試作した。2020年度は、試作した4本のスピンドルシャフトについて製造工程毎の動バランス性能や真円度の個体間のバラツキを分析することで、内面研削による高速主軸用中空シャフトの動バランス性能向上効果を定量的に実証する。本報では、旋削工程後と熱処理工程後のスピンドルシャフトの残留不釣合い、真円度および同心度を実測評価した結果を述べ、考察する。

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、マシニングセンター主軸や研削盤砥石軸の高速化と動的回転振れの低減が昨今の重要な技術課題となっている。工作機械主軸は中空構造であることから製造工程に起因する特有の質量アンバランスの発生が指摘できる。主軸は元材の鍛造工程を経て旋削工程による成形の後、熱処理工程で外面だけでなく中空部内面に変形が生じる。外面については熱処理後の外面研削の工程で設計寸法に対して許容加工精度にて仕上げられる。一方、中空部内面については、後工程の内面研削によって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。産業用回転機械の回転部の動的振れに対する評価基準としては、国際規格 ISO 21940-11 2016¹⁾（国内対応規格 JIS B0905-1992²⁾）で規定された「釣合い良さの等級」が適用される。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 の部分を一回の段取りで研削加工が施せない場合が生じる。その結果、中空部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。このような状況に対して、筆者らが開発を進めてきた超長尺内面研削スピンドル（大久保精工株式会社製：1209TSS ($L/D=14.38$)³⁻⁵⁾、1208TSS ($L/D=15.75$)⁶⁾) は、中空構造の高速回転主軸の中空部内面に起因する質量アンバランスの低減を実現でき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。

2020年度は、前年度に設計・試作した内面研削用スピンドルシャフト4本について製造工程毎の動バランス性能や真円度の個体間のバラツキを分析することを目的とし、旋削工程後と熱処理工程後のスピンドルシャフトについて残留不釣合い、真円度および同心度の実測値について評価を行った。本報では、実測結果を示し、製造工程による動バランス性能や真円度の変遷について考察する。

2. スピンドルシャフトの製造工程における動バランス性能の変遷

2.1 スピンドルシャフト

前年度に設計・試作した内面研削用スピンドルシャフトの軸形状の概略を図1に示す。なお、スピンドルがメーカー開発品であることから図1において形状の詳細は示していない。

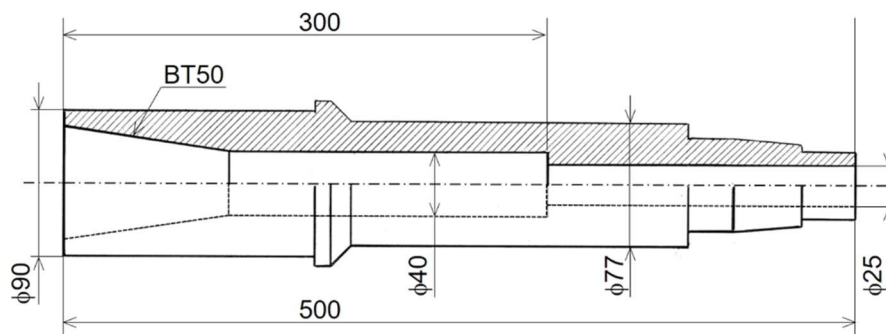


図1 内面研削用スピンドルシャフト（材質：SCM415，質量：約25kg）（単位：mm）

2.2 スピンドルシャフトの動バランス測定

スピンドルシャフトの各製造工程（切削工程，熱処理工程，外面研削工程）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，熱処理工程後，外面研削工程後の計3回，スピンドルシャフトの残留不釣合い（質量アンバランス）を測定した。スピンドルシャフトは図2に示すように釣合い試験機 NAGAHAMA -SCHENCK H20B（株式会社長浜製作所）に搭載し，シャフト中央部にベルト掛けして1,040 min⁻¹で回転させて低速バランスの範囲で二つの修正面での残留不釣合い（単位：g・mm）を測定した。測定結果を表1に示す。修正面が二つの剛体ロータの釣合わせについて，JIS B0905-1992²⁾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1に示す今回のスピンドルシャフトの測定結果に



図2 釣合い試験機（株式会社長浜製作所製 NAGAHAMA -SCHENCK H20B）にて動バランス測定中のスピンドルシャフト

表 1 各製造工程における残留不釣合い測定結果

測定時期	残留不釣合い (単位: g・mm)		
	平均値	標準偏差	G2.5 での許容不釣合い
旋削工程後	43.8	11.4	85.3
熱処理工程後	114.0	37.4	
外面研削工程後	53.3	4.6	

については、二つの修正面での残留不釣合いの和を示した。ISO 21940-11 2016¹⁾ の「Table 1 - Guidance for balance quality grades for rotors with rigid behavior」(JIS B0905-1992²⁾ 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」によると工作機械主軸の釣合い良さの等級は G2.5、研削盤のといし軸の合い良さの等級は G1 となる。

2.3 スピンドルシャフトの幾何特性の測定

スピンドルシャフトの幾何特性が旋削工程後と熱処理工程後でどのように変化するかを評価する。スピンドルシャフトの外径真円度、内径真円度および同心度は、図 3 に示すように大径側(φ90 mm)の端面から 10 mm の位置①を始点とし、同端面から 442.5 mm の位置⑬までの計 13 カ所で測定した。これらの幾何測定は、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⁷⁾。測定結果を表 2 に示す。

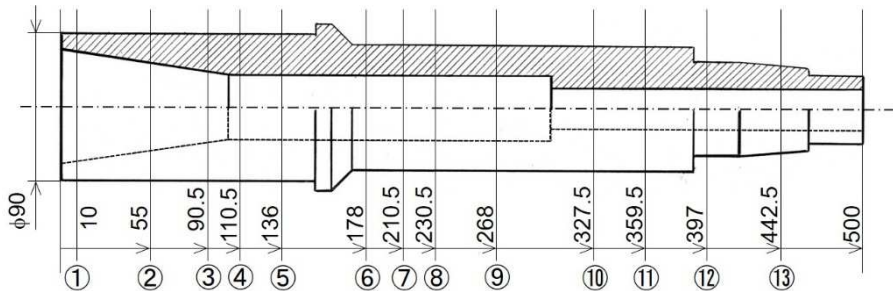


図 3 スピンドルシャフトの外径・内径真円度測定位置 (単位: mm)

表 2 各製造工程における幾何特性の測定結果

	旋削工程後		熱処理工程後	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
外径真円度 (μm)	2.62	0.81	19.75	8.86
内径真円度 (μm)	9.90	4.68	20.91	10.00
同心度 (μm)	10.05	3.27	13.56	8.03

3. 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 1 に示すスピンドルシャフトの残留不釣り合い測定結果を各製造工程と対応させると、旋削工程後の残留不釣り合いの平均値は $43.8 \text{ g} \cdot \text{mm}$ であったが、熱処理工程後の平均値が $114.0 \text{ g} \cdot \text{mm}$ と大幅に増加した。その後、外面研削工程を経ることで残留不釣り合いの平均値が $53.3 \text{ g} \cdot \text{mm}$ に減少し、旋削工程後の平均値に近づいた。一方、標準偏差の値についても、旋削工程後の $11.4 \text{ g} \cdot \text{mm}$ から熱処理工程後に $37.4 \text{ g} \cdot \text{mm}$ と大幅に増加した。その後の外面研削工程を経ることで標準偏差の値が $4.6 \text{ g} \cdot \text{mm}$ となり、旋削工程後の標準偏差の値の 2 分の 1 を下回る小さい値となった。熱処理工程後の研削工程は、単に熱処理で変形した形状を設計寸法に対して許容される寸法に仕上げるだけでなく、各スピンドルシャフトの残留不釣り合いのバラツキを抑制できることが定量的に示された。次にスピンドルシャフトの幾何特性については、外径真円度、内径真円度および同心度のいずれの平均値と標準偏差の値についても、熱処理工程によって大幅に増大することが表 2 から示された。熱処理工程によって、残留不釣り合いが大幅に増大することと真円度と同心度の値が大幅に増大することが今回の 4 本のスピンドルシャフトについて定量的に確認でき、既報⁶⁾ と整合する結果を得た。

試作しているスピンドルシャフトの使用回転数を $7,000 \text{ rpm}$ として、スピンドルシャフトの質量が 25 kg であることから、文献 8 を参照して釣り合い良さの等級 G2.5, G1 および G0.4 の主軸に許容される残留不釣り合い（許容残留不釣り合い U_{per} ）を計算し、表 1 に示した製造工程毎の残留不釣り合いの平均値と併せて図 4 に示す。図 4 から、熱処理工程後のスピンドルシャフトは、 $7,000 \text{ rpm}$ での許容残留不釣り合い $85.3 \text{ g} \cdot \text{mm}$ を大幅に超える残留不釣り合い（ $114.0 \text{ g} \cdot \text{mm}$ ）があり、外面研削工程を経ることで釣り合い良さの等級 G2.5 が達成できた。さらに内面研削工程を経ることで、釣り合い良さの等級 G1 への到達可能性が想定でき、現在評価中である。

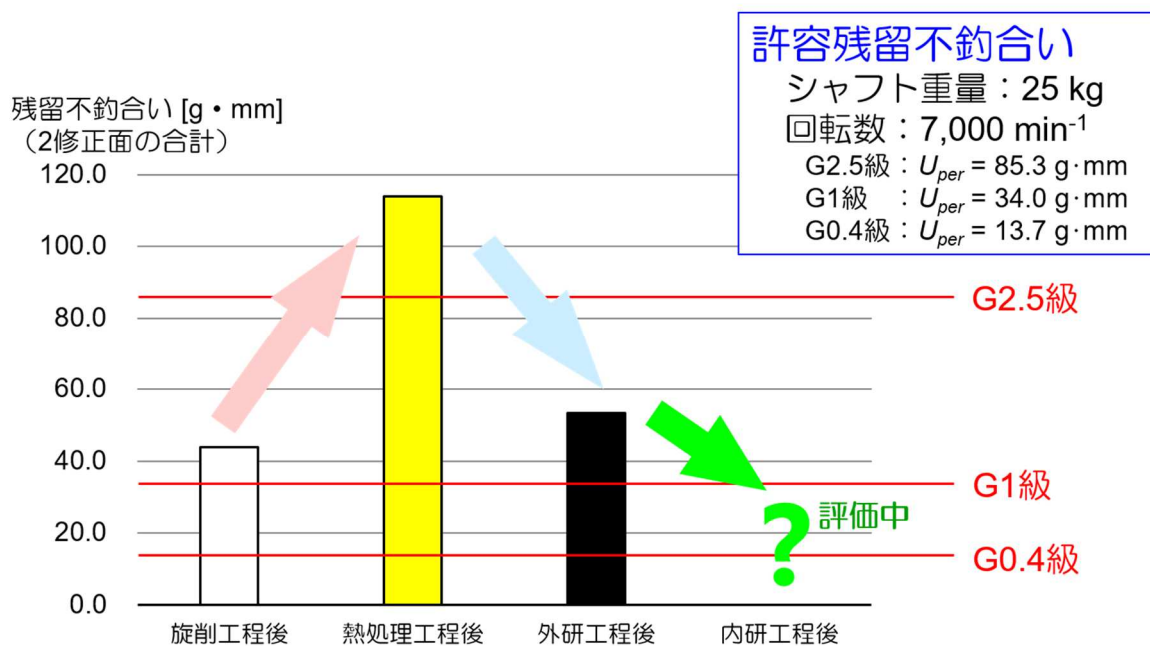


図 4 スピンドルシャフトの製造工程毎の残留不釣り合いと各釣り合い良さの等級に対する許容残留不釣り合い（回転数 7,000rpm）の比較

以上、内面研削スピンドルシャフトの各製造工程における動バランス性能の変遷を分析し、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的に実証した。

本年度に得た内面研削スピンドルシャフトの製造工程毎の特性値の統計データを基に、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研削工程をどのように実施するか検討することが今後の課題となる。

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、2020年度は内面研削スピンドルシャフトの旋削工程後と熱処理工程後の残留不釣合い、真円度および同心度の実測値について評価を行った。本報では、実測結果を示し、製造工程による動バランス性能や真円度の変遷について考察した。本研究プロジェクトで得られる知見は、今後の工作機械主軸の高性能化、特に高速化に寄与する。

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) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 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8報: 内面研削による高速主軸用中空シャフトの動バランス性能向上), 2018年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2018)講演論文集, A20, (2018).
- 7) 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10報: 工作機械主軸開発), 2020年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2020)講演論文集, A23, (2020).
- 8) 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.