

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し、3年間の研究を実施した。工作機械主軸として横軸内面研削盤に搭載するベルト駆動式の内面研削スピンドルシャフト（といし軸）を対象とし、2019年度にシャフトを設計し、シャフト4本の製造に着手した。製造工程におけるシャフトの動バランス性能の推移を明らかにするため、2020年度は旋削工程完了時と熱処理工程完了時のシャフトの残留不釣合いと真円度を実測した。最終年度の2021年度は外面研削工程完了時と内面研削工程完了時のシャフトの残留不釣合いと真円度を実測し、2020年度の測定データと併せることで製造工程における動バランス性能の推移とバラツキの変化を分析した。本研究課題の総括として本報では一連の測定データを示し、製造工程と動バランス性能の関係について分析し、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、例えばマシニングセンター主軸や研削盤といし軸については、運転回転数の高速化と高速回転時の動的回転振れ低減が重要な技術課題となる。加工精度の支配要因の一つである主軸の高速回転時の振れに注目すると、振れの原因となる主軸の質量アンバランス（以下、「質量アンバランス」を「不釣合い」と表記）が主軸製造工程においてどのように推移するかを明らかにすることが主軸製造技術の向上に不可欠となる。産業用回転機械の回転部の不釣合いの評価基準として国際規格 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。同規格では、汎用工作機械主軸は釣合い良さの等級 G2.5、といし軸は同 G1、精密加工機主軸では同 G0.4 がそれぞれ推奨される。

本研究課題では、工作機械主軸として横軸内面研削盤に搭載するベルト駆動式の内面研削スピンドルシャフト（といし軸）を対象とした。同じ材料で同じ工程を経て製造される同じ寸法の4本のシャフトについて、旋削、熱処理、外面研削、内面研削の各工程完了時に不釣合いを測定した。工作機械主軸は自動化ラインで大量生産される機械要素ではなく、一品毎に製造される機械要素であり、製造工程におけるシャフトの不釣合いの平均値の推移とばらつきの変化を調べることで、不釣合いの少ない主軸を製造するための製造工程のキーファクターを明らかにできる。シャフトの不釣合いの測定値から標本平均と標本標準偏差を求め、製造工程における不釣合いの平均値の推移とばらつきの変化として整理し、シャフト形状公差である内径真円度と外径真円度の測定値と比較することで製造工程と動バランス性能の関係について分析した。

2. 内面研削スピンドルシャフト

2.1 製造工程

本研究課題で試作した内面研削スピンドルシャフトの軸形状の概略を図1に示す。なお、本スピ

ンドルシャフトを含む内面研削スピンドルユニットが新規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。

製造工程は、① 旋削工程、② 熱処理工程、③ 外面研削工程、④ 内面研削工程までが図1に示すシャフト単体の製造工程であり、その後、⑤ ユニット組立工程と⑥ 検査工程を経て内面研削スピンドルユニットとして完成する。図2には、旋削後、熱処理後、内面研削加工中、検査工程での静的振れおよびユニット試運転の状況を写した写真を示す。

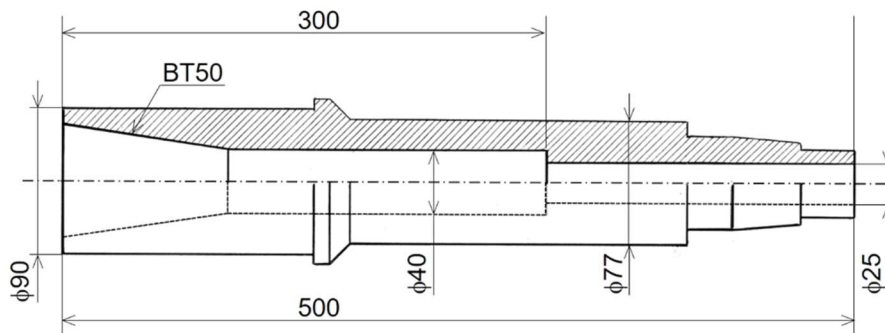


図1 内面研削スピンドルシャフト（材質：SCM415，質量：約25kg）（単位：mm）



(a) 旋削後



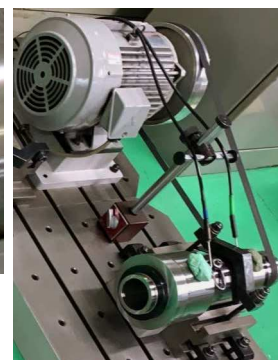
(b) 熱処理後



(c) 内面研削加工中



(d) 検査工程（静的振れ，上）



(e) 検査工程（ユニット試運転，右）

図2 内面研削スピンドルシャフト製造工程の状況

2.2 シャフト動バランスの測定

シャフト製造工程中の動バランス性能の変遷を定量評価するため、各製造工程（旋削，熱処理，外面研削，内面研削）の完了時に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3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 rpm 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を測定した。修正面が二つの剛体ロータの釣合わせについての JIS B0905-1992²⁾「5. 許容残留不釣合いの各修正面への配分」で規定される配分方法を援用し，本研究課題では測定した二つの修正面での残留不釣合いの和を「各工程完了時のシャフトの残留不釣合い」とした。

2.3 シャフト形状公差の測定

シャフト形状公差である外径真円度と内径真円度は，図4でシャフト左側の大径側（ $\phi 90$ 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。真円度は，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3 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

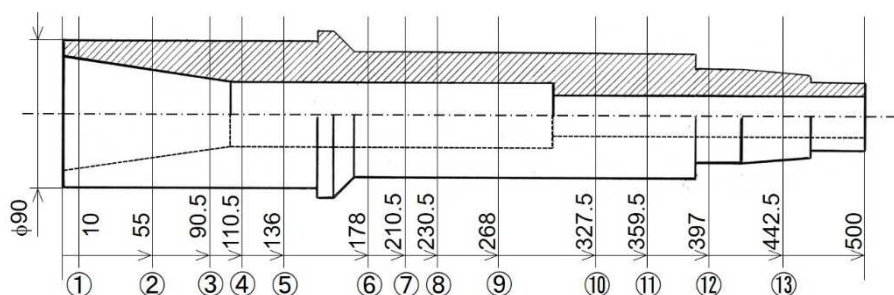


図4 スピンドルシャフトの外径真円度と内径真円度の測定位置（単位：mm）

3. 製造工程におけるスピンドルシャフトの特性量の推移についての分析と考察

3.1 製造工程におけるシャフト動バランスの推移

各製造工程（旋削，熱処理，外面研削，内面研削）の完了時にスピンドルシャフトの残留不釣り合い（質量アンバランス）を測定した結果を表1に示す。表1では，旋削工程完了時に測定したシャフトの残留不釣り合いの標本平均で正規化した各工程完了時の残留不釣り合いの標本平均と標本標準偏差を示す。表1より熱処理工程完了時のシャフトの残留不釣り合いの平均値は旋削工程完了時のシャフトの残留不釣り合いの平均値の約2.6倍となった。外面研削工程を経ることで旋削工程完了時のシャフトの残留不釣り合いの平均値の約1.2倍となり，さらに内面研削工程を経ることで旋削工程完了時のシャフトの残留不釣り合いの平均値の約0.3倍にまで不釣り合いが低減した。一方，標準偏差の値については，旋削工程完了時の0.26から熱処理工程完了時の0.86へと3.3倍の大幅増加となった。その後の外面研削工程を経ることで標準偏差の値が0.11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。さらに内面研削工程完了時の標準偏差の値が0.04となり，内面研削工程を経ることで4本のシャフトの残留不釣り合いのバラツキを劇的に抑制できることが定量的に示された。

3.2 製造工程におけるシャフト形状公差の推移

続いて，旋削工程完了時，熱処理工程完了時，研削工程完了時にそれぞれ測定したスピンドルシャフトの外径真円度と内径真円度の測定結果を表2に示す。表2では，旋削工程完了時に測定したシャフトの外径真円度と内径真円度のそれぞれの標本平均で正規化した各工程完了時の外径真円度

表1 各工程完了時のスピンドルシャフトの残留不釣り合い

主軸製造工程	残留不釣り合い（正規化）	
	平均値*	標準偏差*
旋削工程	1.00	0.26
熱処理工程	2.61	0.86
外面研削工程	1.22	0.11
内面研削工程	0.29	0.04

*旋削工程で測定したスピンドルシャフトの残留不釣り合いの標本平均を基準値として正規化した。

表2 各工程完了時のスピンドルシャフトの真円度

真円度	旋削工程		熱処理工程		研削工程	
	平均値*	標準偏差*	平均値*	標準偏差*	平均値*	標準偏差*
外径真円度	1.00	0.25	7.54	2.57	0.42	0.19
内径真円度	1.00	0.34	2.11	0.84	0.06	0.01

*旋削工程で測定したスピンドルシャフトの真円度の標本平均を基準値として正規化した。

と内径真円度の標本平均と標本標準偏差を示す。表 2 より熱処理工程完了時のシャフトの外径真円度と内径真円度が旋削工程完了時のシャフトの外径真円度と内径真円度に比べて大幅に低下することが確認できた。シャフトの外径真円度と内径真円度は、外面研削と内面研削を経ることで、旋削工程完了時のシャフトの外径真円度と内径真円度に比べて劇的に改善できることが定量的に示された。シャフト 4 本の真円度のバラツキについても、残留不釣合い同様に研削工程を経ることで劇的に抑制できることが定量的に示された。

3.3 考察

本研究課題での一連の特性量の測定により、主軸製造工程中の熱処理によって残留不釣合いが大幅に増大することと真円度が大幅に低下することが定量的に確認でき、既報³⁾と整合する結果を得た。熱処理工程後に続く研削工程は、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、複数本のスピンドルシャフト間のバラツキを劇的に抑制できることが表 1 と表 2 で示すデータから結論できる。以上については、主軸製造業者が経験的に、あるいは業者が社内での工程・品質管理他で収集したデータにて周知の事実であると考えられるが、業者の製造技術レベルを示すデータであることから、研究代表者の知る限り本報に記載した類の数値データは公開されていない。

本研究課題で製造したスピンドルシャフトは、大径内面研削に対応するために図 5 に示すホイールアーバを介して外径 100mm のといしを取り付けることを想定している。外径 100mm の普通といしを取り付けた場合、といし周速に対する条件からスピンドルシャフトの回転数は 6,000 rpm で使用することとなる。実際の運転条件を考慮して釣合い良さの等級 G2.5, G1, G0.4 での許容残留不釣合いの値をスピンドルシャフト単体について試算したので、表 3 に示す。表 3 では、表 2 と同

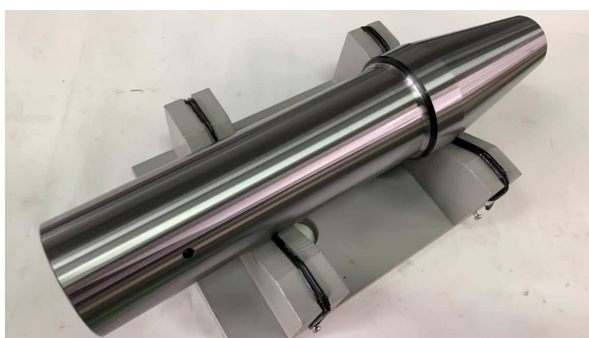


図 5 ホイールアーバ（インタフェース：BT50）

表 3 釣合い良さの各等級での許容残留不釣合い

	G2.5*	G1*	G0.4*
許容残留不釣合い	2.27	0.91	0.36

*回転数 6000rpm で使用すると仮定して各等級での許容残留不釣合いを試算し、旋削工程で測定したスピンドルシャフトの残留不釣合いの標本平均の値で正規化した。

様に旋削工程完了時に測定したスピンドルシャフトの残留不釣合いの標本平均で正規化した値を示す。表3と表2を比較すると、内面研削完了後のスピンドルシャフトは、単体で釣合い良さの等級G0.4に至ることが確認できた。

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、3年間の研究実施期間で得た成果を本報で報告した。主軸製造工程中の熱処理によって、残留不釣合いが大幅に増大することと真円度が大幅に低下することが定量的に確認できた。熱処理工程後に続く研削工程は、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ただけでなく、複数本のスピンドルシャフト間のバラツキを劇的に抑制できることが結論できる。従って、主軸製造工程におけるキーファクターは研削工程であり、最終的な不釣合いの大小を内面研削工程でコントロールすることができる。

本研究課題で得られた知見は今後の高性能工作機械主軸の開発、特に主軸高速化に寄与するものであり、文献4～6で成果を公開した。

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) 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).
- 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).
- 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11報:スピンドルシャフトの製造工程における質量アンバランスのばらつき), 2021年度砥粒加工学会学術講演会(ABTEC2021)講演論文集, C36, (2021) 204.
- 6) 安達和彦, 大久保元博, 高橋宏美, スピンドルシャフトの製造工程における不釣り合いのばらつきに関する事例研究, 日本機械学会 2021年度年次大会講演論文集, No.21-1, (2021), S112-07.