円筒研削盤用熱変位測定装置の開発*
(砥石軸回転に伴う熱変位測定法の検討)清水 伸二^{*1}, 山下 敬美^{*2}, 坂本 治久^{*3}Development of Measurement Device for Thermal Displacement
in Cylindrical Grinding Machines
(Study on Measurement Method for Thermal Displacement with Rotation of Wheel Spindle)Shinji SHIMIZU^{*1}, Takayoshi YAMASHITA and Haruhisa SAKAMOTO^{*1} Sophia University
Kioicho 7-1, Chiyoda-ku, Tokyo, 102 - 8554 Japan

Cylindrical grinding machines are typical machine tools for the final finishing process which produce high accurate and value-added products. However the universal method of measurement and evaluation for their thermal displacement has not been established. Therefore, in this study, we propose a measurement and evaluation method for the thermal displacement of the cylindrical grinding machines with rotation of the wheel spindle and make a device on an experimental basis based on the proposition and examine their validity. As the result of this study, it is made clear that the method proposed by us can measure and evaluate effectively and simultaneously 5 thermal displacements of the cylindrical grinding machines, that is, 3 translational deviations and 2 angular deviations.

Key Words : Thermal Displacement, Measurement Method, Cylindrical Grinding Machine

1. 緒 言

従来より、工作機械の熱変形が加工誤差に占める割合は、40 から 70%であることが指摘され⁽¹⁾、工作機械の熱変形特性に関しては、多くの研究が行なわれてきている^{(2)~(4)}。さらには、工作機械に要求される加工精度がますます高まる中、熱変形問題の解決は、ますます重要な課題となってきた。一方、工作機械のユーザからは、購入時により良い熱変形特性を有している工作機械を選定する、またメーカーからは、自社の熱変形特性の基準に合格した機械を出荷する必要性も高まり、工作機械の熱変位特性評価法を標準化するための研究も多く行われ⁽⁵⁾、これらをもとに国際規格が制定されている⁽⁶⁾。しかしこれらの評価方法は、各軸の送り運動速度や、各主軸回転数での発熱に伴う熱変形を個別に測定する必要がある、熱変形特性評価の高能率化としても多くの課題を残している。これらに対しては、主軸回転数をステップ状に変化させながら、連続運転することにより、各回転数時の熱変位特性を求める方法⁽⁷⁾など、多くの研究がなされている。さらには、工作機械は、多軸化や複合化が進んでおり、これら新しい構造形態の工作機械の熱変位特性評価法についても、研究が行われている⁽⁸⁾。

しかしながらこれらの研究の多くは、旋盤、マシニングセンタやターニングセンタを対象としており、これら切削加工工作機械より一ランク上の加工精度が要求される研削盤については、余り検討がなされていない。これまで行われてきた事例としては、研削盤の熱変形特性と加工精度との関係⁽⁹⁾や、工作物の熱変形特性⁽¹⁰⁾などの研究が中心であり、研削盤の体系的で、普遍的な熱変位測定評価法については、未だ十分な検討がなされていないのが現状である。そこで、本研究では、砥石軸回転に伴う円筒研削盤の熱変位測定法を提案し、それに基づいた装置を試作し、その妥当性について検討する。

* 原稿受付 2011 年 3 月 21 日

^{*1} 正員, フェロー, 上智大学大学院 理工学研究科 (〒102-8554 東京都千代田区紀尾井町 7-1)^{*2} 学生員, 上智大学理工学研究科^{*3} 正員, 上智大学理工学研究科

E-mail: s_simizu@sophia.ac.jp

2. 砥石軸回転に伴う熱変位測定法と測定装置

図1は提案する熱変位測定装置の概要を示している。同図(a)は測定装置の基本構成要素と配置を、同図(b)は、装置の研削盤への装着風景を示している。主軸台には、センサを保持するセンサホルダを装着したベースプレートを取り付けている。また、砥石軸には、熱変位測定の基準面となる、測定基準を取り付けている。この測定基準は、砥石軸への取付誤差の影響を取り除くため、砥石軸に取り付け後、テーブル上に取り付けた旋削工具により、精密旋削仕上げを行っている。このようにして、砥石軸回転中に、砥石軸、工作物主軸間の相対熱変位を測定できるようにしている。ここで、機械の座標系は、同図に示すように、JISに規定されているもの⁽¹¹⁾と同一とし、熱変位の座標系もこれに従うこととした。

図2は、センサホルダへのセンサの取付け状態を示している。図2(b)では、左側が工作物側に対応しており、

Fig.1 Outline of measurement device

Fig.2 Arrangement of the sensors

水平右方向が X 軸のプラス方向に対応し、垂直上向き方向が、Y 軸のプラス方向に対応している。つまり、水平右方向は砥石が工作物から離れる方向であり、垂直上向き方向は砥石が上方向に変位する方向となる。センサとしては、図に示すように軸方向に 3 本（センサ 1, 2, 3）と半径方向 3 本（センサ 4, 5, 6）の計 6 本を用いて、5 自由度の熱変位を求めている。X, Y, Z 方向と傾き方向の相対変位は、これらセンサからの出力を基に、以下のように求められる。

$$\lambda = -(S_4 + S_6)/2 \quad (1)$$

$$dX = S_5 + \lambda \quad (2)$$

$$dY = S_6 + \lambda \quad (3)$$

$$dZ = (S_1 + S_2 + S_3)/3 \quad (4)$$

$$d\theta_x = \tan^{-1} \frac{(S_1 - S_2)}{D_{12}} \quad (5)$$

$$d\theta_y = \tan^{-1} \frac{(S_1 + S_2)/2 - S_3}{\sqrt{3}D_{12}/2} \quad (6)$$

ここで、 λ は測定基準の熱膨張による変位、 dX , dY と dZ は並進方向の熱変位、 $d\theta_x$ と $d\theta_y$ は傾き方向熱変位、 $S_1 \sim S_6$ はセンサ 1 ～ 6 の出力変位、 D_{12} はセンサ 1 とセンサ 2 間の距離を示している。

3. 提案装置による測定実験条件と測定結果

3・1 条件

測定実験には、表 1 に示すような基本仕様の円筒研削盤を用い、以下の 3 条件下で工作物と砥石軸間の相対熱変位を測定した。この際、砥石軸回転時の回転速度は 1610min^{-1} 一定、また測定はサンプリング時間を 30 秒として、約 300 分間行った。

実験条件 1：電源 ON と同時に砥石軸を回転（コールドスタート）

実験条件 2：電源 ON で油圧機器のみ運転（運転準備）

実験条件 3：条件 2 の後、砥石軸を回転（運転準備後、砥石軸回転）

Table 1 Specification of cylindrical grinding machine

Machine type	GE3P-25S II (JTEKT)
Peripheral speed of grinding wheel [m/s]	30
Rotational speed of wheel spindle [min ⁻¹ <rpm>]	1610
Stroke of X-axis [mm]	234.5
Stroke of Z-axis [mm]	387

条件 2 により、電源 ON に伴う油圧機器の発熱のみによる熱変位成分を、そして条件 3 により、砥石軸回転のみによる熱変位成分を測定することを意図している。

3・2 コールドスタート時の熱変位測定結果（実験条件1）

図3(a)は電源ONと同時に砥石軸を回転させたコールドスタート時の環境温度と砥石台前面の表面温度を示しており、図3(b)はその時の相対熱変位の時間に伴う変化を示している。環境温度は初期温度からほとんど変わっていないのに対して、砥石台前面の温度は12.6度の上昇が見られ、一次遅れの傾向を示している。この温度上昇には、油圧機器からの発熱と砥石軸からの発熱の両者が大きく影響しているものと思われる。

並進方向の熱変位は、これに対応して、X、Y、Zの3軸方向に生じていることが分かる。これらもすべて一次遅れの傾向を示しており、両者の相関性が高いと言え、これらの熱変位には上述の温度上昇が影響しているものと思われる。温度上昇は初めの100分程度で急速に増大し、その後、緩やかになり、最終的には飽和状態になる傾向を示している。X軸方向熱変位 dX は、マイナス方向となっており、工作物に切り込む方向に変位している。約110分付近まで増大し、その後、変位は、 $5.5\mu\text{m}$ 程減少する傾向を示し、最終的には $20.9\mu\text{m}$ 程度に収束する傾向を示している。この方向は、工作物に切り込む方向であるので、工作物の寸法が小さくなるように作用することになる。Y軸方向熱変位 dY をみると、砥石軸が $37.7\mu\text{m}$ 上方向に変位していることがわかる。Y軸方向の変位に関しては、砥石径が十分に大きいので工作物の加工寸法への影響はほとんどないと考えられる。一方、Z軸方向熱変位 dZ を見るとマイナス方向となっており、300分後には、砥石軸が主軸台の方向へ $38.8\mu\text{m}$ 熱変位していることがわかる。このZ軸方向の熱変位により、端面研削の場合には、端面寸法に誤差を生じ、テーパ研削の場合には、テーパ面の軸方向位置誤差の要因になるものと思われる。このように、コールドスタート時では、機械各部の発熱による熱変位は、かなり大きいことが分かる。

Fig.3 Temperature change and thermal deviation (cold start)

3・3 運転準備時の熱変位（実験条件2）

図4(a)は、砥石軸を回転させずに、電源ONで油圧機器のみを運転させる運転準備時の砥石台前面の表面温度と環境温度を示しており、図4(b)は、その時の熱変位の測定結果を示している。温度変化の傾向としては、条件1と同じであるが、条件1の12.6度に対して、8.9度と温度上昇量が小さくなっている。

並進方向熱変位も、条件1の熱変位と同じ傾向を示している。温度上昇量は8.9度と条件1における70%になったのに対して、X軸並進方向熱変位は、 $11.7\mu\text{m}$ と条件1の $20.9\mu\text{m}$ の56%の変位になっている。Y軸方向熱変位 dY をみると、 $38.5\mu\text{m}$ と条件1の $37.7\mu\text{m}$ の75%の変位になっており、温度上昇量の差に対応するほどは、小さくなっていない。また、Z軸方向熱変位 dZ を見ると、砥石軸が主軸台の方向へ $26.2\mu\text{m}$ 熱変位していることがわかる。

以上のように、砥石軸を回転させなくてもかなり大きな温度上昇があり、運転準備時の砥石台自身の熱変位が大きいことが分かる。

Fig.4 Temperature change and thermal deviation (in preparing operation)

3・4 運転準備後の砥石軸回転に伴う熱変位（実験条件3）

図 5(a)は、運転準備後の砥石軸回転に伴う環境温度と砥石台前面の表面温度を示しており、図 5(b)は、その時の熱変位の測定結果を示している。運転準備動作により機械が温まった後の測定のため、砥石台前面の初期温度は高くなっているが、温度上昇量としては、条件2の8.9度と比較すると4.5度と小さくなっている。また、その温度変化は、条件2よりゆるやかであることも分かる。

運転準備後の並進方向の熱変位も小さく、これまで示した結果と同じ傾向を示している。測定開始から300分後のX軸方向熱変位dXは、条件2の $11.7\mu\text{m}$ より小さく、 $4.1\mu\text{m}$ となっている。またY軸方向熱変位dYをみると、砥石軸が上方向に $5.6\mu\text{m}$ 程度熱変位しており、条件2の熱変位 $28.5\mu\text{m}$ よりかなり小さくなっており、X軸方向と比較すると、減少量は非常に大きくなっている。一方、Z軸方向熱変位dZを見るとマイナス変位となっており、砥石軸が主軸台の方向へ $3.6\mu\text{m}$ 熱変位している。これは、条件2の熱変位 $26.2\mu\text{m}$ と比較し、かなり小さく、Y軸と同様にX軸方向と比較して、減少量は非常に大きくなっている。したがって、運転準備の効果は、X軸より、Y、Z軸方向の方が大きいと言える。

以上のように、条件3は、条件2よりかなり小さくなっており、条件1の熱変位に大きく影響しているのは、油圧機器などから生じる熱による熱変位で、砥石軸からの発熱による影響は、比較的小さいと言える。したがって、高精度な加工を行うために従来から行われている暖気運転の重要性が裏付けられたと言える。

Fig.5 Temperature change and thermal deviation (after preparing operation)

図6は条件3の傾き方向の熱変位を示している。並進方向の熱変位より時間的な変動が大きくなっているが、これは、測定基準の取付誤差が影響し、角度変位にその影響が増幅されて現れたためと思われる。並進方向と同じように最初の100分程度で大きく変化し、その後安定する傾向にある。ここで、X軸回りの傾き $d\theta_x$ は、砥石軸先端が上方向(Y方向)に変位することを示している。この変位は、加工面に対しては、接線方向の変位であり、加工精度には大きな影響はないと言える。また、Y軸回りの傾き $d\theta_y$ は上方向から見て砥石軸が水平面内で時計回りに傾き変位することを示している。この傾きは工作物の寸法ならびにテーパの角度に誤差を与える要因になるものと思われる。

Fig.6 Angular deviation

4. 測定結果に基づく熱変位特性の評価と本測定法の有効性

4・1 並進方向熱変位挙動の評価

図7(a)は、前述の3状態の運転条件下での砥石軸熱変位の時間的挙動を軸心の軌跡として示したものである。横軸にX軸方向並進熱変位、縦軸にY軸方向並進熱変位を取っている。本図では、工作物と砥石は、図7(b)に示す位置関係になっている。いずれの条件下でも、砥石軸が工作物に近づくように左上方へ熱変位していくこと

(a) Locus of thermal displacement of wheel spindle axis

(b) Positional of grinding wheel spindle and workpiece

Fig.7 Locus of thermal displacement of grinding wheel

がわかる。そして、初めは、X 方向の変位の方が大きく変位し、後半は Y 方向への変位の方が大きくなり、その後、収束することがわかる。

条件 3 では、最終的に、X 軸方向へは $4.1\mu\text{m}$ 、Y 軸方向へは $5.6\mu\text{m}$ の熱変位に収束する傾向を示している。これを条件 1 と比較してみると、X 軸方向では、 $15.9\mu\text{m}$ 減少し、Y 軸方向では、 $32.1\mu\text{m}$ 減少しており、前述と同様に、運転準備の効果が大きいことが分かる。また、加工精度への影響を考慮すれば、いずれの状態でも、120 分の運転後であれば、熱変位の影響の少ない加工が可能であることも分かる。さらに、本研削盤は、砥石台の Y 軸方向の熱変位が大きいという特性を持っていることが分かる。以上のように軸心の熱変位軌跡の評価により、砥石軸の熱変位の方向依存特性も知ることができると言える。

4・2 傾き方向の熱変位挙動の評価

図 8(a)は、条件 3 の傾き方向の熱変位が、砥石幅を 50mm とした場合、砥石の両側でどの程度の並進変位差が生じるかについて示したものである。図 8(b)は、この傾き熱変位によって生じる並進変位差の状態を示している。砥石幅が 50mm 程度と小さければ、余り大きな影響はないと言えるが、大きな砥石幅、あるいは、回転中心から大きく離れた位置では、この傾きの影響は大きくなるものと考えられる。このように、傾き変位は、実際の寸法精度や、工作物の円筒度ならびに、テーパ角度誤差にも影響を及ぼすと言え、傾き変位の影響についても評価する必要があることが分かる。

Fig.8 Wheel displacement by the angular displacement

4・3 総合的な熱変位モードの評価

前述のように、3 運転状態下での熱変位特性はそれぞれ同様の傾向を示している。図 9 は、これらの 5 自由度の測定データを総合的に評価して、本研削盤が 3 次元的にどのような熱変形モードになっているかを推定したも

Fig.9 Thermal deviation state

のである。図に示すように、砥石台は、左方向、ならびに工作物方向に、そして垂直上方向に並進変位するような熱変位を生じている。そしてまた、水平面内ならびに垂直面内で時計回りに傾き変位を生じ、砥石軸端が後方ならびに上方に向かうような熱変位を生じる。このように、3 次元的な熱変形モードもある程度推定可能であることがわかる。

このような熱変位特性を考慮した上で、加工を行うことにより、より高精度な加工を行うことも可能になるものと思われる。

5. 結 言

円筒研削盤の砥石軸回転に伴う熱変位特性の測定評価法について検討した結果、以下のような成果が得られた。

- (1) 円筒研削盤の砥石軸回転に伴う熱変位の測定法とそのための装置を提案できた。
- (2) 本装置により砥石軸回転に伴う、並進熱変位と傾き熱変位を、同時に、かつ高能率に測定可能である。
- (3) これらより、砥石軸心の熱変位軌跡や、三次元的な熱変形モードなど、加工精度と密接な熱変位特性も推定可能である。

文 献

- (1) J. Peklenik, “International Status of Thermal Error Research”, *Annals of The International Academy for Production Engineering(CIRP)*, 16 (1968), p. 203.
- (2) 奥島啓式, 垣野義昭, “精密機械の熱変形 —主として工作機械について—”, 日本機械学会誌, Vol. 75, No. 645 (1972), pp.1371-1377.
- (3) 垣野義昭, “工作機械の熱変形特性”, 機械の研究, Vol.42, No.1 (1990), pp.141-151.
- (4) YOSHIMI ITO, *THERMAL DEFORMATION in Machine Tools* (2010), McGraw-Hill.
- (5) Shinji Shimizu, Noboru Imai, “Effective Measurement of Thermal Deformation of Machine Tools Caused by Linear Axis Motion”, *Proceedings of American Society for Precision Engineering 2002 Annual Meeting* (2002), pp.396-401.
- (6) ISO, Test code for machine tools part3: Determination of thermal effects, *ISO 230-3*(2007).
- (7) Shinsuke Yagyu, Shinji Shimizu and Noboru Imai, “Mechanism of Thermal Deviation Characteristic in Spindle System of Machine Tools”, *Int. J. of Automation Technology*, Vol.2, No3 (2008), pp191-198.
- (8) Shinsuke YAGYU and Shinji SHIMIZU, “Evaluation Method for Characteristics of Thermal Deviation with Swing Motion of Spindle Head for Milling in Multi-task Machines”, *Proceedings of the 4th International Conference On Leading Edge Manufacturing in 21st Century*, Paper No.[315], FUKUOKA JAPAN(2007), pp.441-444.
- (9) 吉田嘉太郎, “円筒研削盤の熱変形”, 日本機械学会論文集, Vol.37, No.293 (1971), pp.188-196.
- (10) 中野嘉邦, 大田勝彦, “平面研削中の工作物の熱変形と研削後の形状誤差”, 精密機械, Vol.139, No.2 (1973), pp.225-229.
- (11) 日本規格協会編, JIS ハンドブック 13 —工作機械 2009—, (2008), p.223, 日本規格協会.