

---


---

# 第4部

---

---

創成研究Ⅲ

所属専攻・学年	機能機械科学専攻 2年
学生氏名	増田 健一 
課題名	少数位置温度測定による 工作機械の熱変形補正に関する研究
コーディネータ教員	立矢 宏（機能機械科学専攻）
課題担当教員	立矢 宏（機能機械科学専攻）
創成研究Ⅱ 派遣先企業	高松機械工業株式会社
創成研究Ⅱ 研修期間	平成20年10月1日～11月30日
創成研究Ⅱ 研修先	石川県白山市

## 平成21年度 創成研究Ⅲ 研究成果報告書

専攻・学年	機能機械科学専攻 2年
氏名	増田 健一
創成研究Ⅱ派遣先名	高松機械工業株式会社
創成研究Ⅱテーマ名	少数位置温度測定による工作機械の熱変形補正に関する研究

### 【1. 創成研究Ⅱ終了後の研究課題の進捗】

創成研究では、旋盤の熱変形補正法という題材で、旋盤の熱変形に関する主な要因である、主軸部とボールねじ部に対し、別々に補正式を導出し、それらを合成することで、補正を行うシステムの開発を行いました。同研究では、三点の温度測定点かつ低コストで、加工精度を60%から70%上昇させることができました。また、実際の加工現場に近い条件で切削試験を行いました。創成研究Ⅱ終了後は、更に別の試験機に同補正方法を適用する方法について検討しています。その結果、過去に行った試験機と同様の改善率を確認することができました。

### 【2. 創成研究に関連した研究活動・研究発表】

機械学会2009年年次大会で発表予定。(アブストを添付しました)

### 【3. 総括】

創成研究Ⅰ～Ⅲを通して振り返り、当プランの趣旨に照らし「消費者」の立場から見て、どのような研究成果を得られたか考察せよ。

創成研究では、工作機械を製造開発する視点から、実際の加工現場ではどのような事が求められているのか検討しなければなりません。企業の方と共に研究を行うことで、学生の視点からではなく、技術者としての視点で製品の研究を行うことができました。加工現場では、そこで働く作業員が操作に関する知識をあまり持っていないことから、専門的な知識の必要となるシステムはあまり好ましくないという問題がありました。研究を行う上でもそのことに注意した結果、フィールド試験を行える段階にまで発展させることができました。製品開発を行うときの最終目標は作業現場で如何に使いやすい製品であるかどうかという点であり、現場での要求を常に考えて研究活動を行うことは、開発から製造までの製品開発の流れの中で、非常に大切であると思います。創成研究を通して、大学の研究だけでは学べなかった、“作業現場”の観点で研究活動を進めていくということを学ぶことができました。

# CNC 旋盤の熱変形簡易補正法の実用化

Practical Application of Simple Method to Compensate Thermal Deformation on a CNC lathe

○増田健一(金沢大院), 正 立矢 宏(金沢大), 学 小林雄太(金沢大院),  
正 金子義幸(高松機械工業), 磯部 稔(高松機械工業), 宮本外志幸(高松機械工業)

Kenichi MASUDA, Hiroshi TACHIYA, Yuuta KOBAYASHI, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, Ishikawa  
Yoshiyuki KANEKO, Minoru ISOBE and Toshiyuki MIYAMOTO, Takamatsu Machinery CO.LTD.,1-8 Asahigaoka,  
Hakusan-shi,Isikawa,924-8558 Japan

This study presents a simple method to compensate the thermal deformation by measuring temperatures at only a few points on a CNC lathe. Approximate functions are derived for the compensation from the thermal deformations of a head stock and a ball screw, which can be considered as the main factor to cause the thermal deformation of a lathe. The approximate formula of the thermal deformation about the headstock is derived as a function of the temperatures measured at a few points and the rotational speed of the main spindle. Furthermore, the approximate formula of the thermal deformation of the ball screw is likewise derived as a function of the temperatures of the ball nut. By using the estimation value of the thermal deformation obtained from both the approximation functions, the study confirms the work error is well compensated.

**Key Words:** Thermal Deformation, Compensation, Machine Tool, Lathe, Spindle, Ball Screw, Headstock

## 1. 緒言

工作機械の熱変形は加工精度に大きな影響を与えることから様々な対策が研究されている。一般的な方法として、空調などを用いて、熱変形を抑制する方法がとられているが、経済性、環境への影響といった観点から好ましくない。そこで、ニューラルネットワークや有限要素法などの数値計算によって熱変形を推定し、加工量を補正する方法が検討されている<sup>(1)(2)</sup>。しかし、多数位置での温度測定や、複雑な解析モデルを必要とし実用化には課題が多い。

以上のような方法に対し、少数位置での測定温度などを変数とする簡便な熱変形予測式を導き、特別な数値計算法を用いずに熱変形の補正を可能とすれば、加工精度の向上が低コストで、かつ、容易に実現できる<sup>(3)</sup>。そこで本研究では CNC 旋盤を対象とし、加工精度に大きく影響する主軸部とボールねじ部の変形を独立に扱い、それぞれの熱変形を近似する簡便な式を導き補正を行う方法を検討する。また、実際の加工現場に近い環境において、補正式の精度をさらに向上させるための手法を提案し、その実用性を確認する。

## 2. 熱変形補正式

**2.1 試験装置** 試験には、高松機械工業(株)製 CNC 旋盤 X-12 を使用した。主軸部およびボールねじ部の発熱による主軸と刃物台間の相対距離(以後、主軸刃物間距離と記す)の変化を、刃物台に取り付けた渦電流式変位センサで測定した。同時に熱変形に影響を及ぼすと考えられる合計 23 箇所の温度変化を測定した。なお、試験は±1℃の温度幅で制御可能な恒温環境下で行った。また、機械の稼働による発熱の影響を受けにくく、環境温度にほぼ等しい基準温度として、ベッド後方位置の温度を用いた。

**2.2 主軸部熱変形補正式** 主軸部熱変形に影響する主な要因として主軸部温度変化量 $\Delta T_h$ の他に、基準温度 $T_0$ 、主軸初期温度 $T_{h0}$ および主軸回転数 $N$ に注目し、これらの条件

を変化させた主軸のみを回転させた試験より主軸部補正式を導いた。得られた式の形を以下に示す。

$$\begin{cases} C_h = 0 & (\Delta T_h \leq \Delta T_0) \\ C_h = A(\Delta T_h - \Delta T_0) & (\Delta T_h > \Delta T_0) \end{cases} \quad (1)$$

$$A = a_0 + a_1 T_a + a_2 T_{h0} \quad (2)$$

$$\Delta T_0 = v_0 + v_1 N + v_2 T_{h0} + v_3 T_a \quad (3)$$

式(1)の $C_h$ は主軸部の熱変形量、 $A$ は主軸補正式の傾き、 $\Delta T_0$ は主軸変形開始温度変化量である。式(2)、(3)に含まれる未知の係数 $a_i(i=0-2)$ 、 $v_j(j=0-3)$ の値は、それぞれ試験結果から重回帰分析とt検定により決定する。

**2.3 ボールねじ部熱変形補正式** ボールねじ部の熱変形はボールナット部の温度変化量 $\Delta T_b$ に相関するととして、ボールねじのみを駆動させた試験における主軸刃物間距離 $C_b$ と同部分との温度関係より補正式を導いた。補正式の形を以下に示す。

$$\begin{cases} C_b = D\Delta T_b & (\Delta T_b \leq \Delta T_{bs}) \\ C_b = D\Delta T_{bs} & (\Delta T_b \geq \Delta T_{bs}) \end{cases} \quad (4)$$

$D$ は $\Delta T_b$ に対する $C_b$ の変化の傾きであり、基準温度およびボールナット初期温度に依存しない定数である。また、 $\Delta T_{bs}$ はボールねじの熱変形が飽和状態となるときボールナット飽和温度変化量として定義される定数である。

**2.4 熱変形補正式** 前節までに示した主軸部およびボールねじ部の熱変形補正式は、各稼働部をそれぞれ単独で駆動した試験より導いている。しかし、実際の切削時には各部が同時に稼働するため、その相乗効果によって、補正式を導く過程では予想していない影響が生じる可能性もある。そのような場合は、切削試験での加工径変化量と、以上で導いた式による補正量との差の校正が必要である。

そこで、まず、式(1)~(4)の精度を確認するため、恒温環

境下での経時変化切削試験を行った。被削材に丸棒材の快削黄銅を用いて、試験開始後から5分後までは1分毎に、30分後までは5分毎に、それ以降は10分毎に実切削を行った。実切削を行わない時間帯は切削プログラムを繰り返してランニング運転させ、暖気運転なしの連続6時間の試験とした。補正は、加工前に3ヶ所の温度、すなわち、主軸部、ボールナット部の温度と、基準温度とするベッド後方位置の温度を測定し、各熱変形補正式からその時点での各部の補正量を算出して、NC装置のオフセット機能へ入力し行った。

しかし、以上の試験結果は十分な補正効果を示さなかった。原因は先述した主軸、ボールねじの同時稼働による相乗効果と考えられる。同効果を簡便に校正する方法として、本研究では式(1)~(4)に校正係数 $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\kappa$ を導入する。校正係数を用いた熱変形補正式を以下に示す。

$$C = \alpha C_h + \beta C_b \quad (5)$$

$$\begin{cases} C_h = 0 & (0 \geq C_h) \\ C_h = A(\Delta T_h - \gamma \Delta T_0) & (0 < C_h) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} C_b = D\Delta T_b & (\kappa \Delta T_{bs} \geq \Delta T_b) \\ C_b = D(\kappa \Delta T_{bs}) & (\kappa \Delta T_{bs} < \Delta T_b) \end{cases} \quad (7)$$

$\alpha$ は主軸側の補正変形量に、 $\gamma$ は主軸の変形開始温度変化量に関係する。また、 $\beta$ はボールねじ側の熱変形量に、 $\kappa$ はボールねじ側の熱変形が飽和状態となるボールナット飽和温度変化量に関係する。

校正係数は実際の加工径変化と補正式による計算値の残差二乗和が最小となるように最小二乗法で決定する。対象機において各校正係数の値を求めた結果、 $\alpha$ は1.06、 $\beta$ は0.81、 $\gamma$ は0.66、 $\kappa$ は1.28となった。

**2.5 補正効果確認試験結果** 決定した補正式の効果を確認するため前節と同条件で切削試験を実施した。試験結果を図1に示す。恒温環境下で加工径変化幅が70%減少しており、提案する方法の有効性が確認できる。

### 3. 実用化へ向けた補正式の検討

**3.1 温度上昇試験** 実際の加工現場では機械周囲の温度は必ずしも恒温状態ではない。そこで、機械周囲温度を一定とせず、空調などを用いた温度変化試験を行った。しかし、同試験条件下では温度に対する加工径変化幅が大きくなり、従来の式では適正な補正が行えなかった。

そこで、前章で導入した主軸部およびボールねじ部の補正量の校正係数を変化させる方法を検討し、室温上昇への対応を試みた。その結果、加工径変化幅を71%減少させることができ、提案する方法の有効性を確認した。

**3.2 一時停止試験** 実際の加工作業に近い条件として、工具交換などにより加工を一時中断する状況を想定し、熱変形補正を検討した。一時停止試験として、試験開始から60分後に10分間、180分後に60分間、300分後に20分間、切削を停止させる条件で切削試験を行った。本試験結果からの補正量をシミュレーションした結果を図2(a)に示す。

同図より加工径変化幅は37%しか減少しておらず、試験再開後の加工径の変動も大きい。これは、試験再開後の加工径の急激な変形に補正式が対応できていないためである。加工径の変動は熱容量の小さいボールねじが駆動停止によって冷却されたため生じたと予測される。しかし、ボールナット部の温度が飽和温度に達している場合、ボールねじ部熱変形の予測量は一定である。

そこで、ボールナット部温度が飽和温度に達した後、試験開始から240分後、320分後においてボールナット部温度上昇量の基準値を同時刻の温度に再設定する手法を提案する。適用した結果を図2(b)より加工径変化幅の改善率を60%までに向上させることができ、同手法の有効性を確認した。

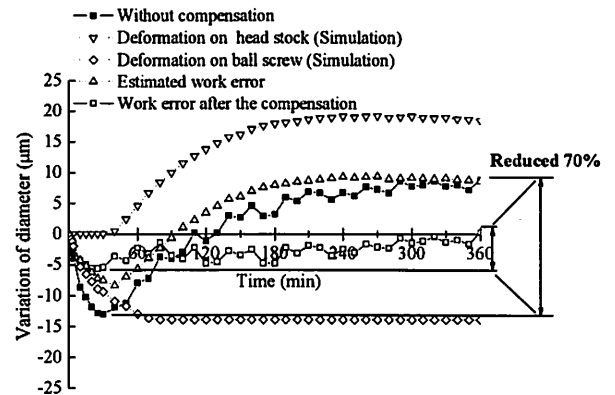
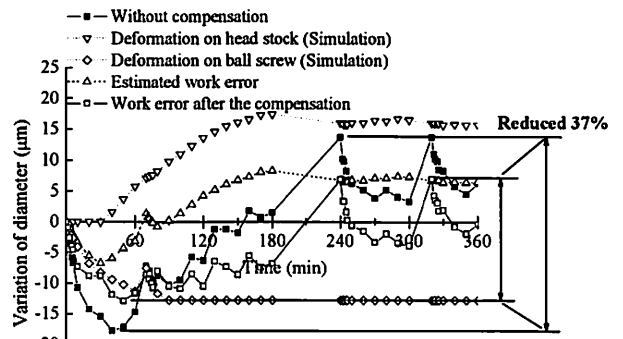
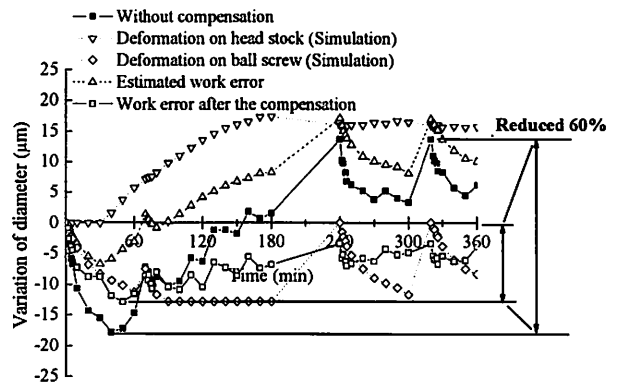


Fig.1 Experimental results of the continuance cutting test



(a) Before improvement



(b) After improvement

Fig.2 Experimental result of the continuance cutting test having intermission

## 4. 結言

- (1)主軸のみを回転させた試験によって、主軸部温度変化量に対する主軸刃物間距離の変化を測定し、主軸部の発熱による変形量を表す簡便な補正式を導いた。
- (2)ボールねじのみを回転させた試験によって、ボールナット部温度に対する主軸刃物間距離の変化を測定し、ボールねじ部の発熱による変形量を表す簡便な補正式を導いた。
- (3)主軸部およびボールねじ部に関する熱変形補正式に校正係数を導入し、実際の加工における精度を向上させた。
- (4)加工の一時中断などの条件を考慮した経時変化切削試験に対し、高精度化を実現するための補正法を提案した。

### 参考文献

- (1) 森脇, 趙, 機論, 58-550,C,(1992),1932-1937
- (2) 田辺, 金子, 齊藤, 他2名, 機論, 70-698,C,(2004),2954-2960
- (3) 金子, 立矢, 田村, 他2名, 機論, 70-726,C,(2007),371-378