



# 回転軸における温度情報の光テレメータリング に関する研究 (第3報)\*

—主軸の熱膨張・熱変位のオンライン推定—

横山和宏\*\* 遠藤覚\*\*\* 鈴木孝昌† 松平雄策†

Optical Telemetry of Temperature Information in Rotating Spindle (3rd Report)  
- On-line Estimation of Thermal Elongation and Thermal Displacement of Rotating Spindle -

Kazuhiro YOKOYAMA, Satoru ENDO, Takamasa SUZUKI and Yuusaku MATSUDAIRA

This paper deals with the accuracy of on-line estimations of the thermal elongation over whole length of the spindle and the thermal displacement of the spindle. The telemetry system is adopted to measure the axial temperature distribution of the spindle. At the same time the elongation and the displacement are measured by capacitive type displacement sensor. Estimated elongation and displacement are compared respectively with measured values, and it is clarified that the estimated elongation and displacement coincide well with measured values: accuracy with error within  $+3.5 \sim -1.6 \mu\text{m}$  for  $100 \mu\text{m}$  elongation and accuracy with error within  $+1.3 \sim -1.3 \mu\text{m}$  for  $13 \mu\text{m}$  displacement.

**Key words:** estimation, thermal elongation, thermal displacement, rotating spindle, temperature, optical telemetry

## 1. 結 言

近年指向されている高速加工用の主軸は最高 10 万 rpm<sup>1)</sup> に及ぶ高回転数で使用されるので、軸受部の発熱による主軸の温度上昇により熱変位が生じる。さらに、数万 rpm 以上の高回転数運転を精度良く実現する必要性から、これらの主軸はビルトインモータ式であるのでモータ部の発熱が加わってますます熱変位が増加する傾向がある<sup>2)</sup>。

前報までに<sup>3) 4)</sup>、熱電対を用いて回転軸の温度を測定し、測定値を赤外線 LED とフォトダイオード PD により静止体側へ伝送する光テレメータシステムについて報告した。このシステムで得られる温度測定値の精度は誤差  $0.1^\circ\text{C}$  以下である。このシステムを用いて NC 旋盤用主軸の軸芯に沿う温度分布を測定し、この温度分布から主軸全長の熱膨張および前方への主軸熱変位を推定した。これらの推定値と実測値とを比較して両者が良く一致することが明らかになったので報告する。

## 2. 実験装置と方法

実験に用いた主軸を図 1 に示す。図 1 (a) は主軸の断面および光テレメータシステムの主要ユニットの配置を示している。主軸ロータの  $\phi 18$  および  $\phi 38$  の軸芯貫通穴の軸方向の温度分布を測定するため、⑨⑩⑪⑫の 4 か所に素線直径  $0.32\text{mm}$  の鉄-コンスタンタン熱電対を設置している。適切な外直径の塩化ビニル製パイプの軸方向にスリットを加工し、このパ

イプを主軸ロータの貫通穴に挿入する。その際のパイプの弾性変形に対応した復元力により、パイプ外周に固定してある熱電対線が主軸ロータの貫通穴内壁に押しつけられる。上記スリットに近接した位置でパイプに小孔を 2 個あけている。この孔の 1 つを通して熱電対の被覆を剥いた鉄線をパイプの内部から露出させ、他の孔からパイプの内部に挿入している。鉄線の露出部は塩化ビニル製パイプの外周に接着固定している。コンスタンタン線はスリットを挟んで、上記の鉄線と平行な位置にあけた別の 2 個の小孔を通して上記と同様に接着固定している。鉄線とコンスタンタン線はスリットを挟んで約  $2\text{mm}$  離れている。したがって、熱電対の高温接点は、鉄線-主軸の接触点と主軸-コンスタンタン線の接触点の 2 つの接触点から成っている。主軸の回転に伴う出力変動を防止するため各チャンネルには遮断周波数  $3.9\text{Hz}$  ( $-3\text{dB}$ ) のフィルタを設置し、誤差  $0.1^\circ\text{C}$  以下の測定精度を得るため主軸 1 回転中の測定値の平均温度を採用している<sup>4)</sup>。

⑨⑩⑪⑫の熱電対はいずれも主軸ロータの貫通穴を経由して、主軸後部の回転ヘッドに導き、計測回路にはんだ付けしている。回転ヘッドの端面にある LED から温度測定値が静止ヘッド上の PD にシリアル信号として伝送される。これらの情報伝送の詳細は文献<sup>3)</sup>に譲る。

図 1 (b), (c) は主軸全長における熱膨張および前方への主軸の熱変位を測定する要領を示している。主軸ロータの軸方向変位がゼロとなる予定の位置はアンギュラコンタクトベアリング 4 列を組み合わせた軸受部の軸方向の中央位置であると考えられる。この位置と同一位置において、主軸ハウジングの両側面に  $\phi 12\text{mm}$  スーパーインバ製丸棒を固定している。このスーパーインバ製丸棒に固定したジグの中央に静電容量型変位計のプローブを固定している。このジグはポリウレタン製の断熱材でカバーし、プローブ外周にはアクリル製円筒カバーを固定

\* 原稿受付 平成 10 年 7 月 21 日

\*\* 正 会 員 新潟大学大学院自然科学研究科 (新潟市五十嵐 2 の町)

\*\*\* 学生会員 新潟大学大学院

† 新潟大学工学部

して、主軸からの熱輻射と主軸回転に伴う暖められた空気流の影響を避けるよう注意した。

プローブ A1 は主軸貫通穴内径における主軸前端面の軸方向変位を測定するために用いる。φ38 mm の主軸貫通穴に、端面を研削したプラグを挿入し、半径方向に拡張固定して測定に用いた。プローブ A2 は、主軸ロータの外周近くの変位を測定するために用いた。プローブ B は主軸後端の変位を測定するために、後端に固定したディスクに対向させて用いた。プローブ B 近くのスーパーインバ製丸棒が振動しないようゴムを介して支持している。スーパーインバ製丸棒の熱膨張は測定変位に影響を及ぼすので、スーパーインバ製丸棒の温度を(27)、(28)に設置した熱電対とデータロガーを用いて測定している。

実験は家庭用エアコンが入っている簡易空調室で行った。連続運転の実験においては 120min 主軸を回転させたあと主軸を停止し、空冷中の状態を 60min 測定した。間欠運転においては、“主軸回転 20min+主軸停止 10min”の運転を繰り返し、120min 以後は主軸を停止した状態で測定を行った。2min ごとに測定を行い、温度については主軸 1 回転分の測定データの平均値を採用した。変位については、被測定対象面が主軸中心線に垂直でなく主軸の回転に伴い指示値が変動していたので、2min ごとに主軸 1 回転中の最大値を測定した。このため、静電容量型変位計を (+Peak, Hold) の状態で 2min ごとにリセットしながら最大指示値を測定した。第 4 章の熱膨張・熱変位の推定においては、連続運転および間欠運転のいずれの場合においても、主軸回転中の測定データのみについて検討した。これは主軸停止中の測定変位には、測定対象面とくに図 2 (b) のディスクが主軸中心線に対し垂直でないことによると考えられる変化が認められたからである。

### 3. 主軸全長における熱膨張・主軸前端面の熱変位の推定

実験開始時の状態からの変化に注目して、主軸全長の熱膨張を次式により推定する。

$$Y_{w1} = a_{w1} X_{w1f} + b_{w1} \quad (1)$$

但し、

- $Y_{w1}$  : 主軸全長における熱膨張の実測値
- $= \delta_{A1} + \delta_{SIA} + \delta_B + \delta_{SIB}$
- $\delta_{A1}$  : プローブ A1 による実測変位
- $\delta_B$  : プローブ B による実測変位

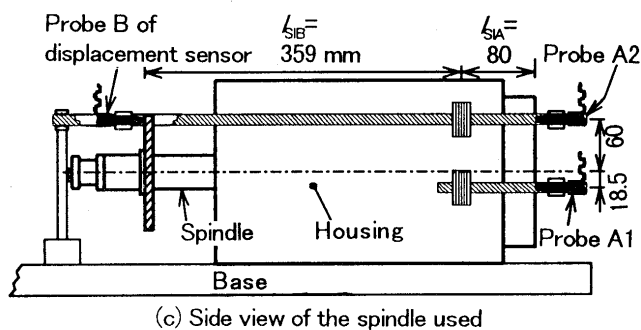
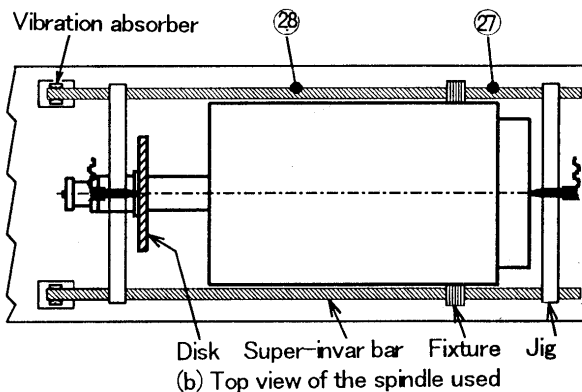
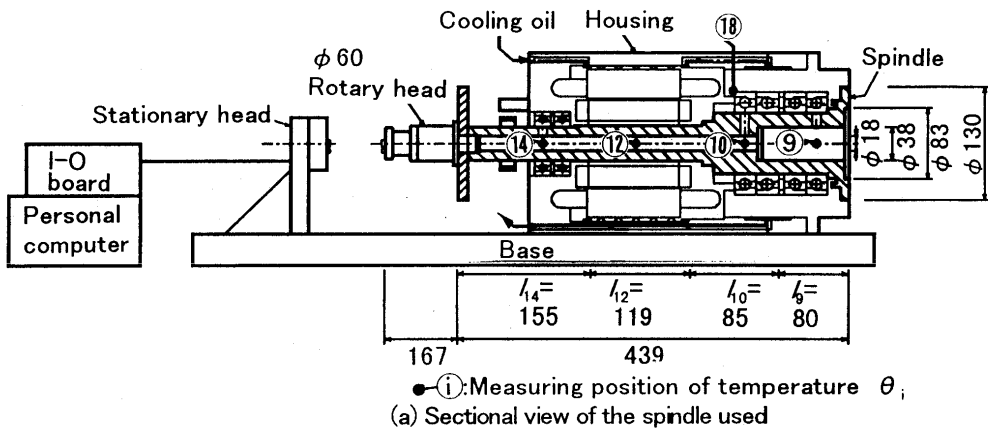


Fig.1 Schematic illustration of temperature measuring position and measurement of spindle elongation

$\delta_{SIA}$  : スーパーインバの長さ  $l_{SIA}$  部の室温変化による熱膨張の計算値  $= \rho_{SI} l_{SIA} \theta_{27}$

$\delta_{SIB}$  : スーパーインバの長さ  $l_{SIB}$  部の室温変化による熱膨張の計算値  $= \rho_{SI} l_{SIB} \theta_{28}$

$X_{w1f}$  : 主軸部の温度上昇にもとづく計算値  $= \rho_{S45C} (I_9 \theta_9 + I_{10} \theta_{10} + I_{12} \theta_{12} + I_{14} \theta_{14})$

$a_{w1}, b_{w1}$  : 係数, 定数

$\rho_{SI} = 1.01 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

$\rho_{S45C} = 10.73 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$

つぎに、主軸前端面の熱変位を次式により推定する。

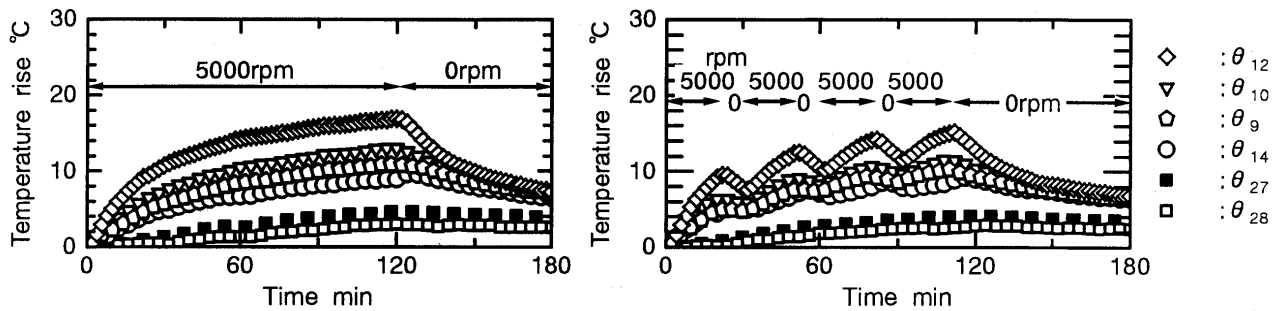
$$Y_{f1} = a_{f1} X_{f1} + b_{f1} \quad (2)$$

$$Y_{f2} = a_{f2} X_{f2} + b_{f2} \quad (3)$$

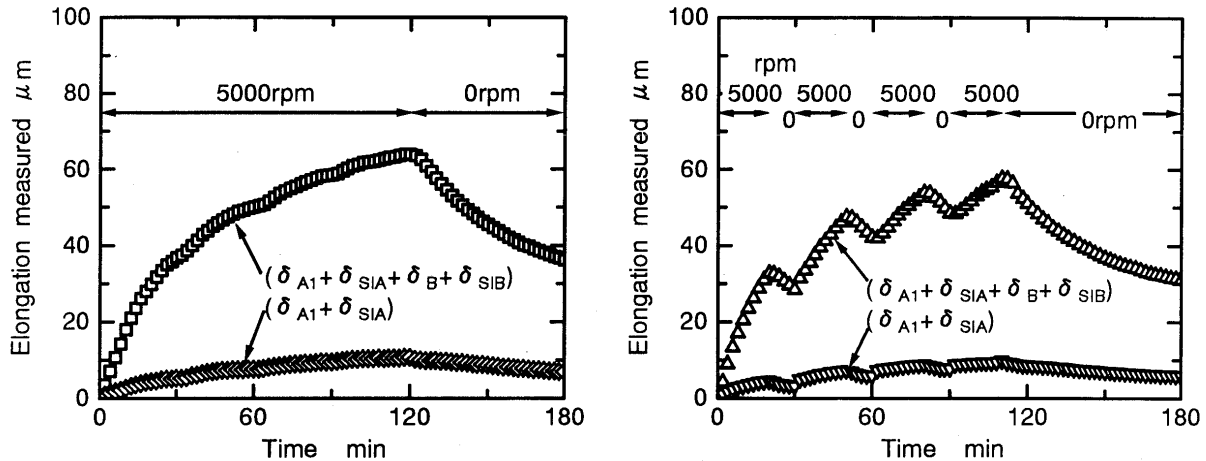
但し、

$Y_{f1}$  : プローブ A1 による主軸前端面の熱変位の実測値  $= \delta_{A1} + \delta_{SIA}$

$Y_{f2}$  : プローブ A2 による主軸前端面の熱変位の実測値



(a) Under continuous running with jacket cooling (b) Under intermittent running with jacket cooling  
Fig.2 Temperature rise of spindle and super-invar bar



(a) Under continuous running with jacket cooling (b) Under intermittent running with jacket cooling  
Fig.3 Spindle elongation measured

$= \delta_{A2} + \delta_{SIA}$   
 $\delta_{A2}$ : プローブ A2 による実測変位  
 $X_f$ : 主軸部の温度上昇にもとづく計算値  
 $= \rho_{S45C} I_9 \theta_9$   
 $a_{f1}, a_{f2}$ : 係数  
 $b_{f1}, b_{f2}$ : 定数

#### 4. 結果

##### 4.1 温度上昇・熱変位の測定結果

図 2 (a) は 5000rpm で 120min 連続運転した場合の主軸ロータの温度上昇とスーパーインバ製丸棒の温度上昇を示す。主軸ロータのうちビルトインモータ部が最も温度上昇が高いことが分かる。主軸の運転に伴いスーパーインバ製丸棒は緩やかに温度上昇している。図 2 (b) は 20min 回転・10min 停止というサイクルを繰り返す間欠運転の場合の結果である。連続運転に比べて温度上昇が全体的にやや小さいものの、他の部分に比べビルトインモータ部の温度上昇が高いことは同様である。

図 3 は主軸全長における熱膨張の実測値、および主軸前端面の熱変位の実測値である。いずれも静電容量型変位計のプローブを支持したスーパーインバ製丸棒の温度変化による熱膨張の影響を補正して図示している。同図 (a) の連続運転においては連続的に主軸が熱膨張している、(b) の間欠運転では主軸停止時に膨張が減少している。

##### 4.2 主軸全長における熱膨張の推定

測定した温度情報から主軸の熱膨張を推定し、オンラインで補正することを目的として、熱膨張の推定精度を検討する。

本節では最も温度が高いビルトインモータ部を含む主軸全長における熱膨張の推定精度を検討する。主軸ロータの 4 か所の温度上昇とこれらに対応する代表長さとの積から求めた計算値 (式 (1) 但し書き  $X_{w1f}$  参照) と実測値の対応を図 4 (a) に示す。両者の対応を詳細に表示するため、同図における  $45^\circ$  方向の直線との差を求め、図 4 (b) に示す。図中の全データに最小 2 乗法を適用し、式 (1) により直線近似した。その結果得られた式 (1) および式 (1) から上下に最も離れた 2 点を通る式 (1) に平行な 2 つの直線を同時に表示している。これらの結果から、式 (4) を熱膨張の推定式として用いると、推定精度は  $\pm 1.6 \mu\text{m}$  であることが分かる。

ただし、 $X_{w1} \approx 28 \mu\text{m}$  のデータは除外している。推定式の勾配が 1.0 よりも大きいのは、式 (5) の計算に用いる温度上昇の測定点が熱源から離れているため、主軸の熱膨張に比べて  $X_{w1}$  に時間遅れがあることによるものと考えられる。

$$Y_{w1} = 1.08 X_{w1} + 0.7 \mu\text{m} \quad (4)$$

$$X_{w1} = \rho_{S45C} (I_9 \theta_9 + I_{10} \theta_{10} + I_{12} \theta_{12} + I_{14} \theta_{14}) \quad (5)$$

##### 4.3 主軸前方への熱変位の推定

本節では、主軸前側のアンギュラコンタクトベアリング 4 個の中央を軸方向変位ゼロとして、主軸前端面の熱変位の推定精度について検討する。計算値  $X_f = \rho_{S45C} I_9 \theta_9$  に用いる代表長さは  $I_9 = 80\text{mm}$  とし、温度測定点  $\theta$  は代表長さの中央に位置させている。熱変位の実測値と計算値  $X_f$  との関係を図 5 (a) に示す。さらに両者の関係を詳細に検討するため、同図における  $45^\circ$  方向の直線との差を求め、図 5 (b) に示す。図中の全データに最小 2 乗法を適用し、式 (2) により直線近似

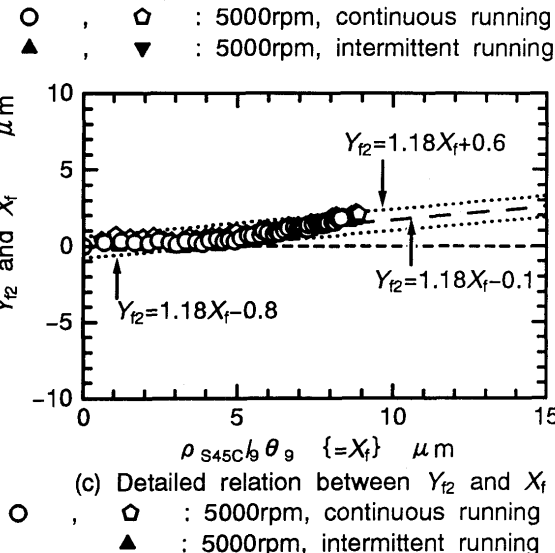
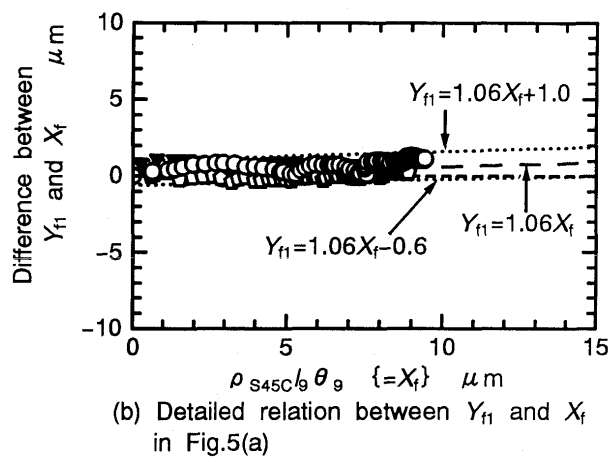
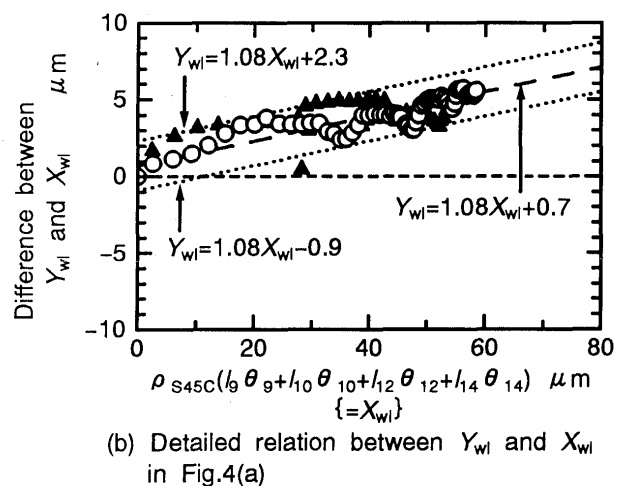
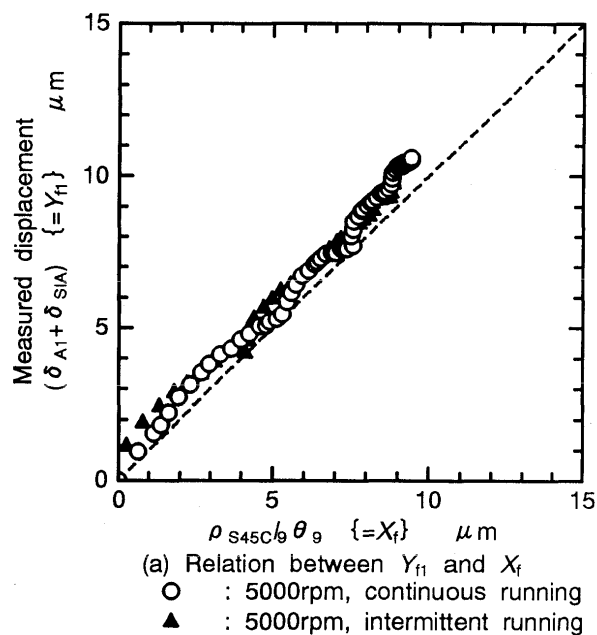
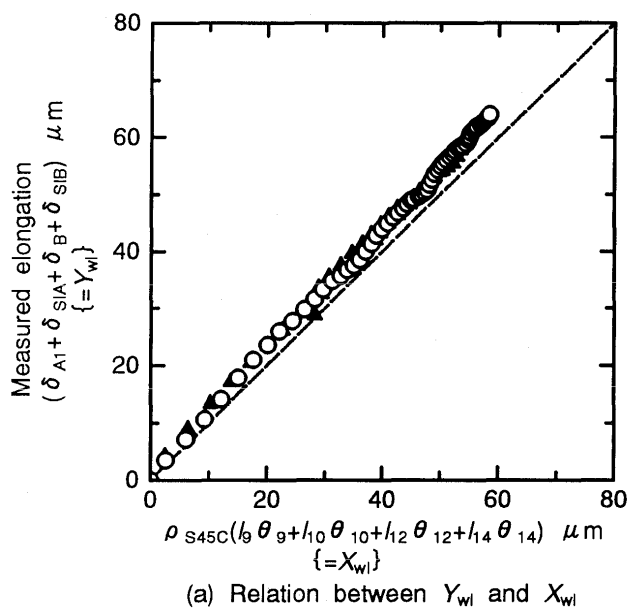


Fig.4 Relation between measured elongation  $Y_{wl}$  and calculated value  $X_{wl}$  of the spindle over whole length during running

- : 5000rpm, continuous running with jacket cooling
- ▲ : 5000rpm, intermittent running with jacket cooling

した。これらの結果から、 $Y_{f1} = 1.06 X_f \mu m$  を熱膨張の推定式として用いると、推定精度は+1.0、-0.6  $\mu m$  であることが分かる。同様に、プローブ A2 で測定した主軸前端面の外周近くの変位についても、推定精度を検討した。その結果を図 5 (c) に示す。この場合、 $Y_{f1} = 1.18 X_f - 0.1 \mu m$  となり、図 5 (b) に比べて係数が大きいのは、変位測定点が外周に近いので熱源に近い（：主軸の外周に近い）領域の熱膨張を反映しているためと考えられる。

4.4 熱膨張・熱変位の推定精度

図 4 (b)、図 5 (b) はジャケット冷却した場合の推定の結果である。これらを含め、ジャケット冷却しない場合の結果を表 1 に示す。さらに、ベアリングの予圧変化や焼付きに関する情報として計測するベアリングインナレースの温度分布<sup>4)</sup>を熱膨張・熱変位を推定するためにも利用する場合の推定式と推定精度（表 1 下 2 行参照）をもまとめて表 1 に示す。この場合の推定式の係数が主軸貫通穴内壁の温度上昇から推定する場合（表 1 上 3 行参照）の係数に比べて小さいの

Fig.5 Relation between measured displacements  $Y_{f1}, Y_{f2}$  of the front end of spindle and calculated value  $X_f$  during running with jacket cooling

は、熱源に近いため温度上昇がより高いベアリングインナレースの温度を用いて推定するので、変位の推定値がより大きくなることによるものと考えられる。しかし、表 1 から明ら

Table 1 Relation between measured displacement and estimated value

Relation between	With jacket cooling	Without jacket cooling
$Y_{w1}$ and $X_{w1f}$ ( $=\rho_{S45C}(I_9\theta_9+I_{10}\theta_{10}+I_{12}\theta_{12}+I_{14}\theta_{14})$ )	$Y_{w1}=1.08X_{w1f}+0.7\mu\text{m}$ [+1.6, -1.6] [(3.2 $\mu\text{m}/58\mu\text{m}$ ) $\times 100=6\%$ ]	$Y_{w1}=1.05X_{w1f}\mu\text{m}$ [+2.8, -1.2] [(4.0 $\mu\text{m}/86\mu\text{m}$ ) $\times 100=5\%$ ]
$Y_{f1}$ and $X_f(=\rho_{S45C}/I_9\theta_9)$	$Y_{f1}=1.06X_f$ [+1.0, -0.6] [(1.6 $\mu\text{m}/10\mu\text{m}$ ) $\times 100=16\%$ ]	$Y_{f1}=1.03X_f$ [+0.9, -0.5] [(1.4 $\mu\text{m}/13\mu\text{m}$ ) $\times 100=11\%$ ]
$Y_{f2}$ and $X_f(=\rho_{S45C}/I_9\theta_9)$	$Y_{f2}=1.18X_f-0.1$ [+0.7, -0.7] [(1.4 $\mu\text{m}/9\mu\text{m}$ ) $\times 100=16\%$ ]	$Y_{f2}=1.09X_f$ [+1.3, -1.3] [(2.6 $\mu\text{m}/13\mu\text{m}$ ) $\times 100=20\%$ ]
$Y_{w1}$ and $X_{w1b}$ ( $=\rho_{S45C}(I_1\theta_1+I_4\theta_4+I_{12}\theta_{12}+I_7\theta_7)$ )	$Y_{w1}=1.01X_{w1b}$ [+1.7, -0.5] [(2.2 $\mu\text{m}/66\mu\text{m}$ ) $\times 100=3\%$ ]	$Y_{w1}=1.01X_{w1b}$ [+3.5, -0.7] [(4.2 $\mu\text{m}/100\mu\text{m}$ ) $\times 100=4\%$ ]
$Y_{f2}$ and $X_{b1}(=\rho_{S45C}/I_1\theta_1)$	$Y_{f2}=1.15X_{b1}-0.3$ [+1.1, -0.9] [(2.0 $\mu\text{m}/11\mu\text{m}$ ) $\times 100=18\%$ ]	$Y_{f2}=1.09X_{b1}+0.1$ [+0.9, -1.0] [(1.9 $\mu\text{m}/16\mu\text{m}$ ) $\times 100=12\%$ ]

{ $\Delta_{u1}$ ,  $\Delta_{l1}$ } :  $\Delta_{u1}$ :difference between upper-limit datum and the estimating equation above

$\Delta_{l1}$ :difference between lower-limit datum and the estimating equation above

[{ $(\Delta_{u1}-\Delta_{l1})/\text{max of measured displacement}$ } $\times 100 = \text{error percentage}$ ]

かなように、いずれの場合も推定式の精度は主軸全長の膨張に対しては +3.5~-1.6 $\mu\text{m}$ 、主軸前面の変位に対しては +1.3~-1.3 $\mu\text{m}$ と高い精度が得られていることが分かる。

## 5. 結 論

開発した光テレメータシステムを用いて、NC 旋盤主軸の熱膨張・熱変位のオンライン推定について検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 主軸の軸方向温度分布では、ビルトインモータ部が最も温度上昇が高い。
- (2) 主軸の軸芯にあけた貫通穴の穴壁の温度を測定した。この温度・代表長さ・熱膨張係数の積の総和から主軸全長の熱膨張量を推定する式を求めた。推定精度は主軸全長 439mm の熱膨張量(最大) 100 $\mu\text{m}$  に対して +3.5~-1.6 $\mu\text{m}$  以内であった。
- (3) 主軸前端面の前方への熱変位についても推定式を求めた。推定精度は熱変位(最大) 16 $\mu\text{m}$  に対して +1.3~-1.3

$\mu\text{m}$  以内であった。

## 謝 辞

本研究に用いた主軸は日本精工(株)精機技術センタから貸与していただきました。ここに記して深く感謝いたします。また、研究に協力していただいた4年次学生横山幸夫君に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) 高橋一郎, 安齋正博, 新野俊樹, 加瀬 究, 松岡甫篁, 中川威雄: 超高速ミーリング機(HICART)の開発, 1998年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1998) 244.
- 2) 中村晋哉, 垣野義昭: 高速スピンドルにおける回転中の軸受予圧変化と主軸変位の解析, 精密工学会誌, 58, 12 (1992) 2019.
- 3) 横山和宏, 鈴木孝昌, 星名浩樹: 回転軸における温度情報の光テレメータリングに関する研究(第1報), 精密工学会誌, 62, 7 (1996) 1009.
- 4) 横山和宏, 遠藤 覚, 鈴木孝昌: 回転軸における温度情報の光テレメータリングに関する研究(第2報), 精密工学会誌, 64, 9 (1998) 1355.