

## 熱膨張量推定のためのボールねじ温度分布測定位置の選定\*

Selection of Measuring Position of Ball-screw Temperature Distribution  
for Estimation of Thermal Elongation

横山 和宏\*<sup>1</sup>      小寺 岳彦\*<sup>2</sup>      永井 豊\*<sup>2</sup>      鈴木 孝昌\*<sup>3</sup>  
(Kazuhiro YOKOYAMA)    (Takehiko KODERA)    (Yutaka NAGAI)    (Takamasa SUZUKI)

The optical telemeter system developed is used to measure the temperature distribution of ball-screw and to estimate the thermal elongation of the ball-screw. This paper deals with the selection policy of the measuring position of the temperature. One of the main heat sources is the contact zone between the groove surface of ball-screw and the rolling ball. It is experimentally examined the temperature distribution right under the groove valley and at other positions of the inner surface of hollow ball-screw. It is clarified that the temperature difference due to measuring position within lead length is less than 0.07°C under the driving condition less than 20m/min table speed. Thus the every position within lead length is available for the temperature measurement to estimate the thermal elongation of ball-screw.

*Key words:* measuring position, temperature, ball-screw, thermal elongation, optical telemeter

## 1. 緒 言

生産能率向上のため、NC 工作機械や産業用ロボットの高速送りが実施されている。これらの多くはボールねじで駆動されているので、高速送りの実施に伴って、ボールねじ・ナット間の発熱量が増大する。その結果、ボールねじの熱膨張による位置決め精度の低下が生じる。この対策として、ボールねじ駆動用サーボモータの電機子電流からボールねじの温度分布と熱膨張量を計算する研究<sup>1)</sup>および原点復帰時にボールねじ全長の熱膨張量を検知し、長手方向の熱膨張が均一であると仮定して位置決めインプロセス補正を行う研究<sup>2)</sup>が報告されている。さらに、具体的な対策としてフルクロズドシステムを導入すると、精度は良いものの、コストが上昇することになる。著者らは、サーボモータのパルスを送りバックするセミクロズドシステムでシングルアンカの機械について、コスト上昇を抑制しながら必要な精度を実現するという対策について検討している。即ち、回転軸の温度を測定する光テレメータシステム<sup>3),4)</sup>を用いてボールねじ温度分布を測定し、これを基にボールねじの熱膨張量を推定<sup>5)</sup>する。この推定値を補正量として CNC 制御装置に入力することにより、リアルタイムで位置決め精度を補償するシステムを実現しようとしている。その基礎として本研究では、移動熱源であるねじ溝と転動ボールとの接触

領域と温度測定点との位置関係を詳細に検討し、温度測定点の選定方針を検討した。

## 2. 実 験

## 2.1 温度分布測定位置の検討

図 1 は実験に使用した 1 軸のボールねじ実験装置である。サーボモータ側のボールねじ支持軸受の位置でスラスト方向の位置を固定したシングルアンカ方式で、サーボモータのパルスをフィードバックするセミクロズド制御を行っている。ボールねじの諸元を表 1 に示す。ボールねじの熱膨張量を推定するために、ボールねじの温度を光テレメータシステム<sup>3),4)</sup>で測定する。ボールねじの熱源は、サーボモータ、支持軸受およびボールねじ用ナットである。サーボモータと支持軸受は、ボールねじ端面または端面近くに位置する定位置熱源であるので、これらの熱源に対しては、熱源と温度測定点間の相対距離に注意して測定点を決定すれば良い。

他方、ボールねじ用ナットはテーブル移動とともにその位置が変化する移動熱源である。これに基づく温度分布を必要な程度詳細に求め、且つ測定点数を抑制するには、測定点の位置と熱源位置との関係を検討しておく必要があると考えられる。図 2 は、実験に用いたボールねじ用ナットによる熱源と温度測定点の候補位置との関係を示している。この熱源の位置はナットの中を循環する転動ボールとねじ溝の接触領域である。この接触領域は、拡大図に示すように、ボールねじの溝と転動ボール間の接触領域 2 箇所である。この 2 箇所の熱源に対し、図 2 にお

\* 原稿受付 2005年6月21日

\*1 正会員, 新潟大学工学部  
(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050番地)

\*2 非会員, 新潟大学大学院(同上)

\*3 非会員, 新潟大学工学部(同上)

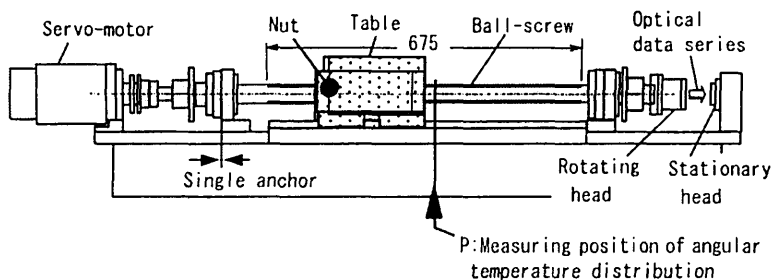


Fig. 1 Experimental set-up and measuring position of angular temperature distribution

Outer diameter	φ 40mm
Inner diameter	φ 17mm
Lead	12mm
Material	Cr Mo-steel (JIS:SCM420)
Coefficient of thermal expansion	$12 \times 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ (measured value)
Lubricant	Grease
Pre-load	Constant gap preloading
Anchoring	Single anchor

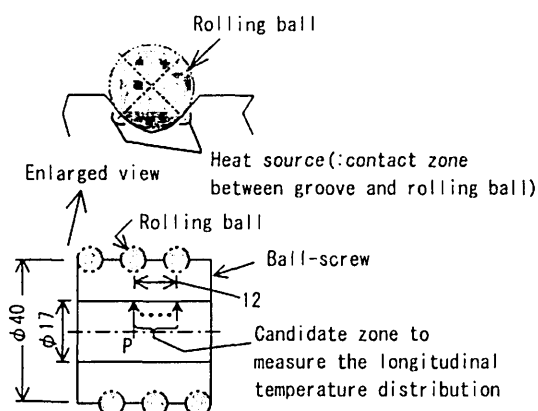


Fig. 2 Heat source and candidate zone of temperature measurement of ball-screw

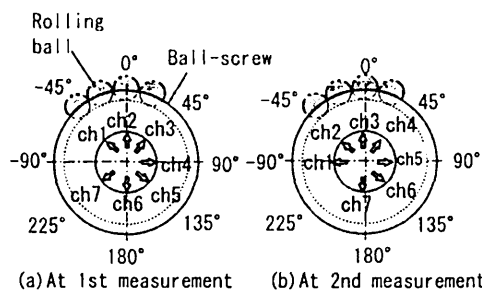


Fig. 3 Measuring position of angular temperature distribution

いて、熱電対高温接点をリード 12mm のどこに設置すべきかを明らかにするため、この間の温度分布を実験的に検討する。

しかし、リード 12mm の範囲内に複数の温度測定点を設置することは、スペースが不十分で設置できない。いま、熱源が溝内に連続して存在する状況を仮定すると、リード 12mm の中央点の温度は、点 P と同一断面内の 180° 離れた点の温度に等しいと考えられる。同様の写像の関係から、リード 12mm の間の各点の温度は、点 P と同一断面内の 360° にわたる各点の温度に等しいと考えられる。そこで、リード 12mm 間の長手方向温度分布の代わりに、図 3 に示すように、ボールねじの一断面内において 45° 毎の各点における温度を測定し、角度方向温度分布を詳細に検討する。

### 2.2 実験方法と実験条件

角度方向温度分布を測定する位置は、図 1 に示すように、有効ねじ部 675mm の中央である。ボールねじ軸芯には φ 17mm の穴が空いている。この穴壁の温度を測定するため、図 4 に示すように、塩ビパイプの温度測定点付近のみを φ 17mm としている。φ 17mm の塩ビパイプの 45° 毎に短いスリットを加工し、角度方向に 8 箇所領域に分けている。それぞれの領域に 4 個の小孔を空ける。塩ビパイプの空洞内部を経

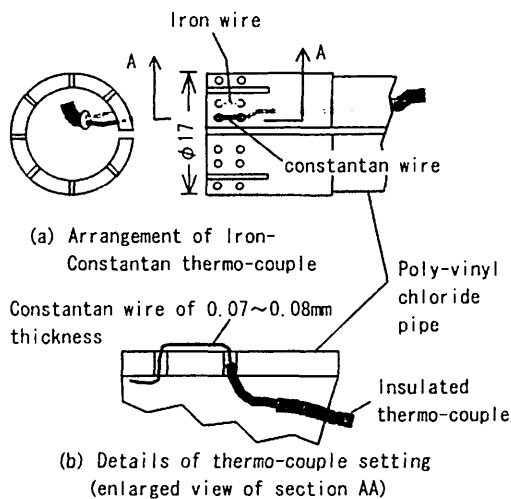
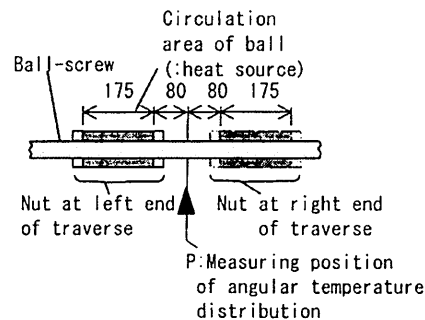


Fig. 4 Thermo-couple setting for measurement of angular temperature distribution

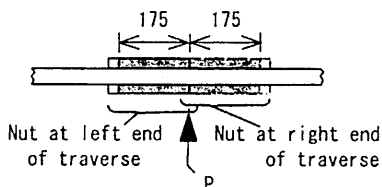
由して熱電対線を導き、熱電対線の先端部は鉄線、コンスタンタン線をむき出しにしている。それぞれの線は図 4 (b) に示すように、上記の小孔から塩ビパイプ外周にはみ出させた後、再び別の小孔から塩ビパイプの内部空洞に戻している。塩ビパイプは全長にわたって長いスリットを加工してあるので、φ 17mm のボールねじ空洞内に、鉄線とコンスタンタン線を外周部にはみ出させた φ 17mm の塩ビパイプを挿入すると、はみ出させた熱電対線の厚さに応じて塩ビパイプは弾性変形し、これに対する復元力で鉄線とコンスタンタン線をボールねじ内壁に押し付けることになるので、熱電対回路が閉じた状態になる。その結果、コンスタンタン線とボールねじ内壁が接触す

Table 2 Experimental conditions

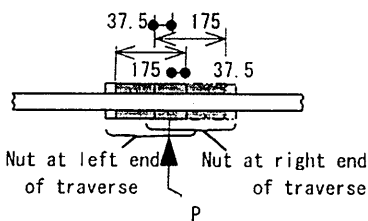
Table traverse speed	5 m/min	20 m/min
Pattern of nut traverse		
A (cf. Fig. 5)	Experiment No. A-05	No. A-20
B	No. B-05	No. B-20
C	No. C-05	No. C-20



(a) Pattern-A of nut traverse



(b) Pattern-B of nut traverse



(c) Pattern-C of nut traverse

Fig. 5 Traverse pattern of nut on the ball-screw

る部分の内、測定回路に最も近い接触点に相当する熱起電力が測定される。即ち、この熱起電力は、文献(6)の式(2.11)で表され、熱電対素線の鉄線とボールねじ材料のクロムモリブデン鋼 SCM420 がほぼ同一の熱電能を有していると考えられること、および鉄線とボールねじ内壁との接触点温度がコンスタントとボールねじ内壁との接触点温度に近い場合には、上述のコンスタント線とボールねじ内壁接触部の、測定回路に最も近い接触点に相当する熱起電力が得られると考えられる。

φ0.32mm の熱電対素線を押しつぶし、感温部の厚さを 0.07~0.08mm として用いている。これは、熱電対線の感温部と被測定面間の接触面積を増加させ、

Table 3 Specification of the optical telemeter system adopted

Range		0~50°C
Transmission rate		6,200 data/s (for only 1 channel) 8ch×700 data/s
A/D converter		8ch, 12bit 1 LSB≒0.0122°C
Accuracy	Max. difference in temperature among 7 channels*	0.10°C
	Max. difference in temperature change among 7 channels*	0.05°C
Power supply		Non-contact supply or Battery
Power consumption in rotating head		5V×(6.5~8)mA

\*One channel is used to measure the electric circuit board temperature for accuracy improvement.

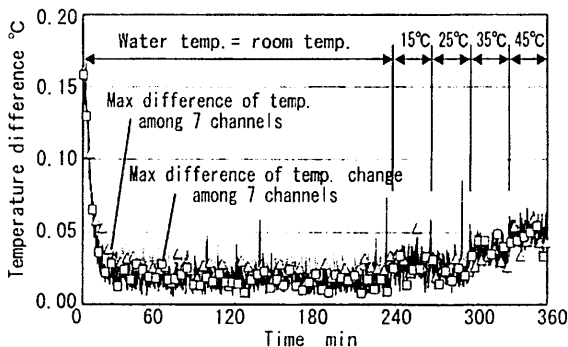


Fig. 6 Measurement accuracy of the optical telemeter system adopted

熱伝導誤差を小さくするため、および接触部の熱電対熱容量を小さくし温度変化への速応性を高めるためである。

実験条件を表2に示す。図5に示すように、ナットの移動パターン A はナット内の転動ボールの循環領域(即ち、熱源領域)が温度測定位置 P を左右に 80mm 行過ぎる場合である。パターン B は熱源領域の端が温度測定位置 P に一致する場合である。パターン C は熱源領域が温度測定位置 P を常に覆っている場合である。

### 3. 実験の結果

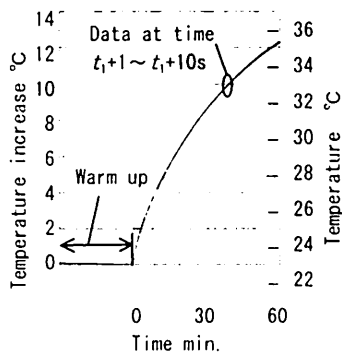
#### 3.1 角度方向温度分布の解析

##### 3.1.1 温度測定

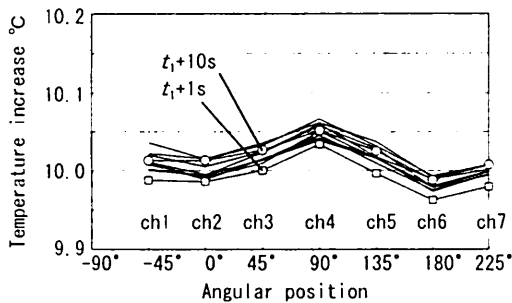
リード 12mm の間の長手方向温度分布の代わりに、ボールねじの一断面内における角度方向温度分布を詳細に検討する。温度分布測定には開発した光テレメータシステム<sup>3),4)</sup>を用いる。システムの仕様を表3に、測定精度を図6に示す。光テレメータシステム

は8チャンネル用であるが、1チャンネルを回転ヘッド内の電気回路基板の温度測定に用い、その結果を使って温度測定の精度向上を図るため、残り7チャンネルをボールねじの温度測定に使用できる。そこで、7チャンネル間の温度の最大差および温度変化の最大差により図6の測定精度<sup>(4),5)</sup>を表している。

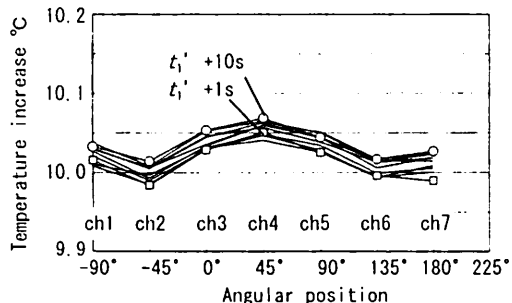
温度の最大差とは、各時刻における7チャンネルの温度測定値の最大値と最小値との差で定義する。図6の結果から、20minのウォーミングアップ後の温度の最大差は約0.06°Cであることが分かる。また、温度変化の最大差とは、光テレメータシステムのウォーミングアップ中の出力変化の影響を除去するため、ウォーミングアップ終了時の各チャンネルの温



(a) Example of temperature and temperature increase of ch1~ch7



(b) Angular distribution of temp. increase at every sec. during [t<sub>1</sub>+1s~t<sub>1</sub>+10s]



(c) Angular distribution of temp. increase at every sec. during [t<sub>1</sub>' +1s~t<sub>1</sub>' +10s]

Fig. 7 Result of experiment No. A-05 (Pattern A, table speed 5m/min.)

度を基準とし、それ以後の温度変化に注目し、各時刻における7チャンネルの温度変化の最大値と最小値との差で定義する。ある時刻を基準とし、各部位のそれ以後の温度変化に基づいて熱変形が生じるというメカニズムを考慮して、温度変化の最大差を定義している。

図7(a)は、図3(a)に示す位置に熱電対を設置した1回目の実験で得られた温度と温度上昇の結果を示す。7チャンネルの平均温度上昇が10°Cに近い10s間について、角度方向の温度分布を検討する。図7(b)は10s間の1s毎の温度上昇の分布である。いずれの時刻においても、ch4により測定した角度位置90°における温度上昇がやや高い結果が得られている。図7(c)は、図3(b)のように塩ビパイプごと熱電対の設置位置を反時計方向に45°スライドさせて設置した2回目の実験で得られた結果である。この場合にも、ch4による測定値がやや高くなっている。これは図6に示した測定精度における、チャンネル間の指示値の差(；即ち感度の差)に基づくものと考えられる。

3.1.2 データ処理

そこで、以下のデータ処理により、チャンネル間の感度差の影響を除去して、角度方向の温度上昇の分布を検討する。1回目と2回目の実験における熱電対位置および温度上昇の関係を表4に示す。1回目の実験におけるボールねじの温度上昇 $\theta_i$ およびその測定出力 $\phi_{ch_i}$ は(t<sub>1</sub>+1~t<sub>1</sub>+10)sの間にも温度上昇するので、1s毎の平均温度上昇を基準値 $\phi_{Ref}$ に一致させる。2回目の実験では、熱電対の設置位置を反時計方向に45°スライドさせている。1回目とほぼ同じ温度上昇の10s間について、1回目と同様に1s毎の平均温度上昇を基準値 $\phi_{Ref}$ に一致させる。

次に、光テレメータシステムのチャンネル間の感度差の影響を除去して、角度方向の温度上昇分布を式(1)~(7)により求める。

$$\begin{aligned} \theta_{-45^\circ} - \theta_{-90^\circ} &\approx \{\phi_{ch1}(\theta_{-45^\circ}) + \Delta\phi_1\} - \{\phi_{ch1}(\theta_{-90^\circ}) + \Delta\phi_2\} \cdots (1) \\ \theta_{0^\circ} - \theta_{-45^\circ} &\approx \{\phi_{ch2}(\theta_{0^\circ}) + \Delta\phi_1\} - \{\phi_{ch2}(\theta_{-45^\circ}) + \Delta\phi_2\} \cdots (2) \\ \theta_{45^\circ} - \theta_{0^\circ} &\approx \{\phi_{ch3}(\theta_{45^\circ}) + \Delta\phi_1\} - \{\phi_{ch3}(\theta_{0^\circ}) + \Delta\phi_2\} \cdots (3) \\ \theta_{90^\circ} - \theta_{45^\circ} &\approx \{\phi_{ch4}(\theta_{90^\circ}) + \Delta\phi_1\} - \{\phi_{ch4}(\theta_{45^\circ}) + \Delta\phi_2\} \cdots (4) \\ \theta_{135^\circ} - \theta_{90^\circ} &\approx \{\phi_{ch5}(\theta_{135^\circ}) + \Delta\phi_1\} - \{\phi_{ch5}(\theta_{90^\circ}) + \Delta\phi_2\} \cdots (5) \\ \theta_{180^\circ} - \theta_{135^\circ} &\approx \{\phi_{ch6}(\theta_{180^\circ}) + \Delta\phi_1\} - \{\phi_{ch6}(\theta_{135^\circ}) + \Delta\phi_2\} \cdots (6) \\ \theta_{225^\circ} - \theta_{180^\circ} &\approx \{\phi_{ch7}(\theta_{225^\circ}) + \Delta\phi_1\} - \{\phi_{ch7}(\theta_{180^\circ}) + \Delta\phi_2\} \cdots (7) \end{aligned}$$

これらの式は、例えば式(2)については以下のように導入できる。

$$\begin{aligned} \theta_{0^\circ} - \theta_{-45^\circ} &= \{\theta_{0^\circ} + \Delta\phi_1\} - \{\theta_{-45^\circ} + \Delta\phi_1\} \\ &= \{\theta_{0^\circ} + \Delta\phi_1\} - \{\theta_{-45^\circ} + \Delta\phi_2\} \\ &\approx \{\phi_{ch2}(\theta_{0^\circ}) + \Delta\phi_1\} - \{\phi_{ch2}(\theta_{-45^\circ}) + \Delta\phi_2\} \cdots (8) \end{aligned}$$

即ち、1回目と2回目の実験において、同一の温度上昇が生じていると仮定し、平均温度上昇が一致する

ように、表4に示す測定出力のレベル調整を行って  
るので、式(8)の1行目を2行目で近似できる。次  
に、図3に示すように、ch2は1回目の実験では角度  
0°の位置の温度測定に用い、2回目の実験では角度  
45°の位置の温度測定に用いたので、式(8)の2行目  
は3行目で表される。式(8)3行目の式は同一チャン  
ネルの出力のみで表されているので、チャンネル間の  
感度差の影響を除去して、角度方向の温度上昇の分  
布を求められる。同様にして、式(1)~(7)を導入する  
ことができる。

3.1.3 角度方向の温度上昇の分布

1回目と2回目の測定データについて、表4に対  
応したデータ処理を行った結果の一部を表5に示す。

表2に示す条件の実験を行い、上記のデータ処理  
を行って得られた、角度方向の温度上昇の分布を図  
8に示す。図8(a)(b)(c)に示すテーブル速度 5m/min  
の場合における温度上昇の最大値と最小値との差は、  
(d)(e)(f)に示すテーブル速度 20m/min の場合のそれ  
に比べて小さい。図8中で角度方向の温度上昇の差が

最も大きいのは、図8(e)の場合に認められ、最大値  
と最小値との差が0.07°Cであった。

式(8)に示すように、45°異なる角度位置の温度上  
昇を同一チャンネルにより測定しているの、チャ  
ンネル間の感度差である図6の温度変化の最大差  
0.06°Cは、上述の0.07°Cには殆ど影響を及ぼしてい  
ないと考えられる。表3に示すように本研究で用いた  
A/D変換の分解能は1LSB=0.0122°Cである。従って、  
上述の0.07°Cは1~2LSBの精度を有するものと推定  
している。

3.2 熱膨張量推定用の温度分布測定位置

図8(e)における最大値と最小値との差0.07°Cは、  
角度方向の温度上昇分布であるが、2.1節の観点から、  
ボールねじの長手方向の温度測定位置がリード  
12mmのどの位置であるかによって生じる測定値の  
差に相当すると考えられる。ボールねじ熱膨張量を  
文献(5)の式(2)を用いて推定する場合、上記  
の差0.07°Cに相当する熱膨張量推定値の差は、ボー  
ルねじ1m当り  $12 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C}) \times 1 \times 10^6 (\mu\text{m}) \times$

Table 4 Procedure for angular distribution of temp. increase

At 1st measurement	Ball-screw temp. increase	$\theta_{-90^\circ}$	$\theta_{-45^\circ}$	$\theta_0$	$\theta_{45^\circ}$	$\theta_{90^\circ}$	$\theta_{135^\circ}$	$\theta_{180^\circ}$	$\theta_{225^\circ}$	
	Output + $\Delta\phi_1$	$\phi_{ch1}(\theta_{-45^\circ}) \phi_{ch2}(\theta_0) \phi_{ch3}(\theta_{45^\circ}) \phi_{ch4}(\theta_{90^\circ}) \phi_{ch5}(\theta_{135^\circ}) \phi_{ch6}(\theta_{180^\circ}) \phi_{ch7}(\theta_{225^\circ})$								Average + $\Delta\phi_1 = \phi_{Ref}$
At 2nd measurement	Ball-screw temp. increase	$\theta'_{-90^\circ}$	$\theta'_{-45^\circ}$	$\theta'_0$	$\theta'_{45^\circ}$	$\theta'_{90^\circ}$	$\theta'_{135^\circ}$	$\theta'_{180^\circ}$	$\theta'_{225^\circ}$	
	Output + $\Delta\phi_2$	$\phi_{ch1}(\theta'_{-90^\circ}) \phi_{ch2}(\theta'_{-45^\circ}) \phi_{ch3}(\theta'_0) \phi_{ch4}(\theta'_{45^\circ}) \phi_{ch5}(\theta'_{90^\circ}) \phi_{ch6}(\theta'_{135^\circ}) \phi_{ch7}(\theta'_{180^\circ})$								Average + $\Delta\phi_2 = \phi_{Ref}$
Eq. for angular distribution of temp. increase		Eq. (1)	Eq. (2)	Eq. (3)	Eq. (4)	Eq. (5)	Eq. (6)	Eq. (7)		

$\theta_{-45^\circ}, \theta'_{-45^\circ}$ : Ball-screw temp. increase at 1st, 2nd measurement at -45° angular position

$\phi_{ch1}(\theta_{-45^\circ})$ : Output of ch1 by the optical telemeter system

$\phi_{Ref}$ : Reference temp. increase close to output

$\Delta\phi_1, \Delta\phi_2$ : Adjusting value to make coincidence the average of output with  $\phi_{Ref}$

Table 5 Calculation example of angular distribution of temp. increase in case of experiment No. A-05

At 1st measurement	Time (-90°)	ch1 (-45°)	ch2 (0°)	ch3 (45°)	ch4 (90°)	ch5 (135°)	ch6 (180°)	ch7 (225°)	Average + $\Delta\phi_1 = \phi_{Ref}$
	$t_1 + 1s$	9.99°C	9.99°C	10.00°C	10.04°C	10.00°C	9.96°C	9.98°C	9.99°C
	+ $\Delta\phi_1$	+0.01	+0.01	+0.01	+0.01	+0.01	+0.01	+0.01	+0.01 = 10.0
	...	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
At 2nd measurement	Time (-90°)	ch1 (-45°)	ch2 (0°)	ch3 (45°)	ch4 (90°)	ch5 (135°)	ch6 (180°)	ch7 (225°)	Average + $\Delta\phi_2 = \phi_{Ref}$
	$t_1 + 1s$	10.02°C	9.98°C	10.03°C	10.05°C	10.03°C	10.00°C	9.99°C	10.01°C
	+ $\Delta\phi_2$	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01	-0.01 = 10.0
	...	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
	$t_1 + 10s$	10.03	10.01	10.05	10.07	10.04	10.02	10.03	10.04
		-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04 = 10.0

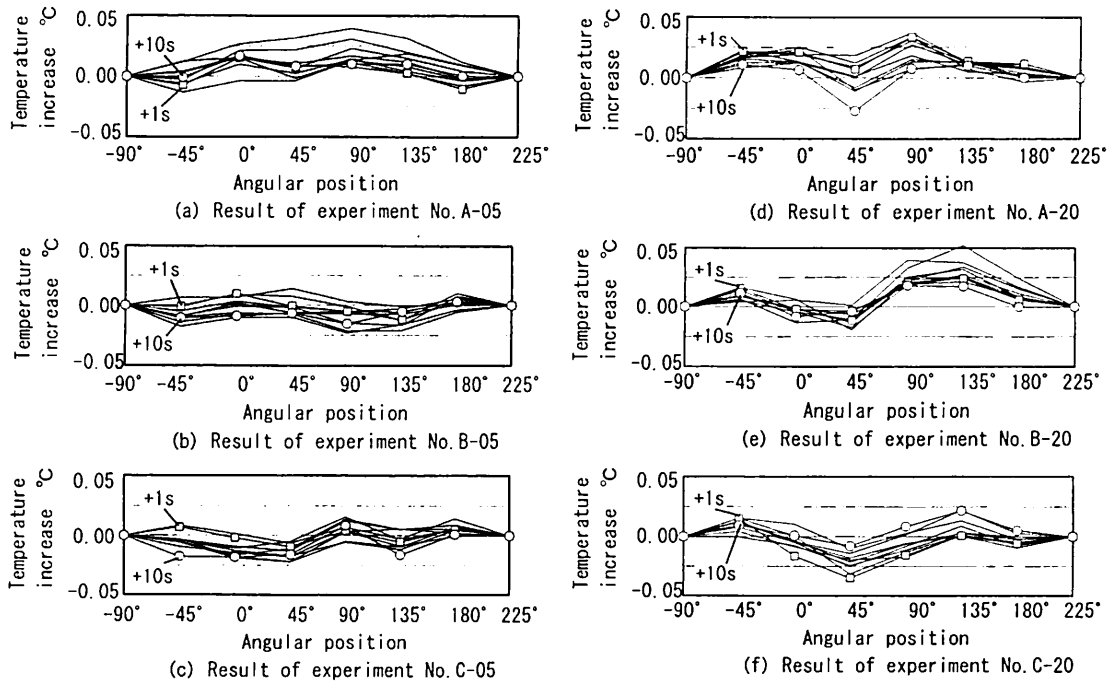


Fig.8 Angular distribution of temp. increase at every sec. during 10sec.

0.07(°C)=0.84 $\mu$ mである。また、0.07°Cは図7(a)に示す温度上昇10°Cの0.7%であり、これに基づく熱膨張量推定値の差はボールねじ熱膨張量<sup>5)</sup>の0.7%になり、十分小さいと考えられる。従って、熱膨張量推定に用いる長手方向の温度分布測定位置はリード12mmのどの位置であっても、熱膨張量推定値に及ぼす影響は小さいと考えられる。

このことは、熱膨張による位置決め誤差をリアルタイムで補償するシステムを設計・構築する場合、温度測定位置を自由に選定できることを意味している。

#### 4. 結 言

ボールねじの熱膨張量推定に用いる温度分布測定位置の選定について、実験により検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 測定チャンネルの感度差の影響を小さくする温度分布測定法・データ処理法を提案した。
- (2) 外直径40mm、貫通穴直径17mm、ねじ溝リード12mmの一条ボールねじにおいて、熱膨張量推定に用いる穴内面温度の測定位置は、移動熱源であるねじ溝と転動ボールの接触領域に対し、リード12mm内のどの位置でも差し支えない。

#### 参 考 文 献

- 1) 垣野義昭, 森一晃, 夏書強, 木本康雄, 森山浩光, 東本暁美: NC工作機械におけるボールねじの熱変位補正, 精密工学会誌, 54,9(1988),1753.
- 2) 幸田盛堂, 村田梯二, 上田完次, 杉田忠彰: マシニングセンタにおけるボールねじ熱膨張誤差の自動補正, 日本機械学会論文集C編, 56,521(1990),154.
- 3) 横山和宏, 鈴木孝昌, 小林滋, 松平雄策, 永井豊: ワンチップ・マイクロコントローラを用いた回転軸温度情報の光学式非接触データ伝送システムの研究(第1報 小型化, 小電力化および回路構成), 精密工学会誌, 67,12(2001),2037.
- 4) 永井豊, 横山和宏, 鈴木孝昌, 小寺岳彦: ワンチップ・マイクロコントローラを用いた回転軸温度情報の光学式非接触データ伝送システムの研究(第2報 測定精度), 精密工学会誌, 69,10(2003),1480.
- 5) T.Kodera, K.Yokoyama, K.Miyaguchi, Y.Nagai, T.Suzuki, M.Masuda and T.Yazawa: Real-time Estimation of Ball-screw Thermal Elongation Based upon Temperature Distribution of Ball-screw, JSME Int. J., Series C, 47, 4(2004), 1175.
- 6) 棚澤一郎, 西尾茂文, 河村洋, 笠木伸英, 吉田豊明: 伝熱研究における温度測定法, (株)養賢堂(1985),23.