

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) *

—計測可能時間の延長・熱電対高温接点が主軸に導通している場合の計測—

横山 和宏** 遠藤 覚*** 鈴木 孝昌†

Optical Telemetry of Temperature Information in Rotating Spindle (2nd Report)

- Extension of Measuring Period and Measurement in the Case
with Thermocouple Hot Junction Short-circuited to Spindle -

Kazuhiro YOKOYAMA, Satoru ENDO and Takamasa SUZUKI

This paper deals with an improvement of the telemetering system for practical use. Large capacity rechargeable battery and power supply regulator are adopted and 22.5 hours continuous measurement is confirmed. Output of the telemetering system with thermocouple hot junction short-circuited to the spindle is fluctuated accompanied by spindle rotation. For this fluctuation the following three procedures are applied and the measurement accuracy of the telemetering system with error less than 0.1°C is confirmed: low-pass filtering, using averaged data of temperature and shortening the length between two contact points of thermocouple hot-junction contacting with the spindle. Also the inner-surface temperature of inner-race of rolling bearing is measured.

Key words: optical telemetering, temperature, rotating spindle, inner-race temperature, rolling bearing

1. 緒 言

前報¹⁾では、回転主軸の温度観測と軸受部の焼付き防止および主軸の熱膨張推定への応用を目標として、熱電対を用いた回転軸の温度測定と測定値の光伝送を実行できる光テレメータシステムについて、基本構成と性能を明らかにした。しかし、測定可能時間が4minと短かったこと、および熱電対高温接点が主軸に接触し導通している状態では、測定点の温度が変動していないにもかかわらず主軸回転に伴う出力変動が生じるという問題点があった。

そこで、本報告では電源部を改良して測定可能時間22.5hを実現した。さらに、主軸回転に伴う上記の出力変動について、特性を検討するとともに実用性を考慮した対策を検討し、誤差が 0.1°C 以下の測定精度を確認した。さらに、ベアリングのインナレース内面の温度を測定した。

2. 実験装置

実験に用いた装置を図1に示す。前報¹⁾におけると同様、パソコンが指令したチャンネルの温度を測定し、この測定値を回転ヘッド上の赤外線発光素子LEDからシリアルデータとして静止ヘッド上の受光素子PDへ伝送し、これをパソコンに入力する。温度を測定するチャンネル番号ももう一組のLEDとPDにより、シリアルデータとして静止ヘッドから回転ヘッドへ伝送する。主軸の後端に回転ヘッドを設置している。回転ヘッドの中にはシリアルパラレル変換器、熱

電対用の増幅素子AD594C、ADコンバータ、同期クロック発生器、パラレルシリアル変換器および充電式バッテリーと電源回路などを収納している。

図1中の①、④、⑦はベアリングインナレース内面の温度測定点である。主軸とベアリングを組み立てたあと、必要に応じて熱電対を挿入したり撤去できるようになっている。主軸の半径方向にあげた $\phi 3\text{mm}$ の穴に、熱電対を主軸の中心部から外周部に向かって挿入する。熱電対の鉄線とコンスタンタン線は直接接触せず、鉄線とインナレースの接触点、インナレースとコンスタンタン線の接触点の2つの接触点を有する熱電対回路²⁾を構成している。この2つの接触点は上記 $\phi 3\text{mm}$ の穴の中に納まっているので、両接触点間の距離は3mm以下である。これは、3.3.1項の検討にもとづき、主軸回転に伴う出力変動への対策として2つの接触点間の距離を短くするための処置である。ベアリングインナレース内面への押付け力は、主軸の回転中心軸に沿う貫通穴の中に設置した塩化ビニルパイプ上の熱電対支持点と高温接点(インナレース内面と熱電対素線との接触点)との間の熱電対自身の曲がりに対する復元力により確保されるよう工夫した。鉄-コンスタンタンの芯線は $\phi 0.32\text{mm}$ 、両方の芯線は外側の被覆で束ねた状態で同時にインナレースに押しつけられる。ただし、両芯線の先端は直接接触しないよう被覆の外側へ折り曲げている。

図1中の②は主軸貫通穴の内面の温度測定点である。上記の塩化ビニルパイプの外表面に鉄線とコンスタンタン線を約2mm離れた位置で露出させ、主軸貫通穴の内面に接触させている。この場合、熱電対の押付け力は塩化ビニルパイプの弾性変形に対する復元力で確保されている。塩化ビニルパイプは長手方向に沿ってスリットを加工し、適切な復元力が得られるように工夫した。熱電対は、いずれも前報¹⁾に詳述した要領でジュワー氏びんを用い、特性の校正を行っている。

⑧はベアリングアウトレースの外周近くのハウジング温度の測定

* 原稿受付 平成10年5月11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

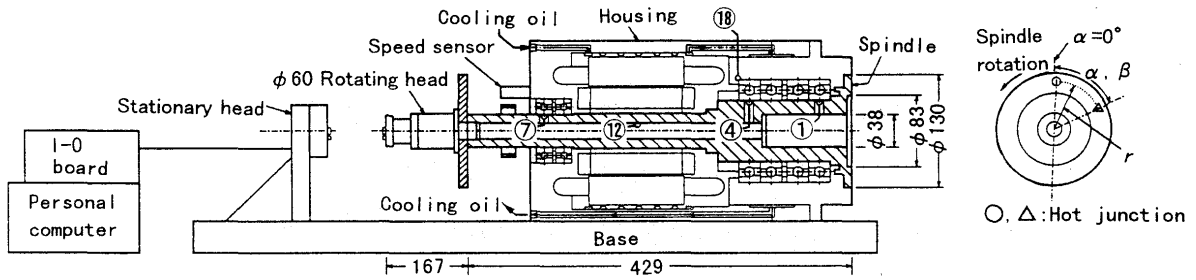


Fig.1 Measuring position of temperature θ_i in the spindle used

①: Measuring position of temperature θ_i

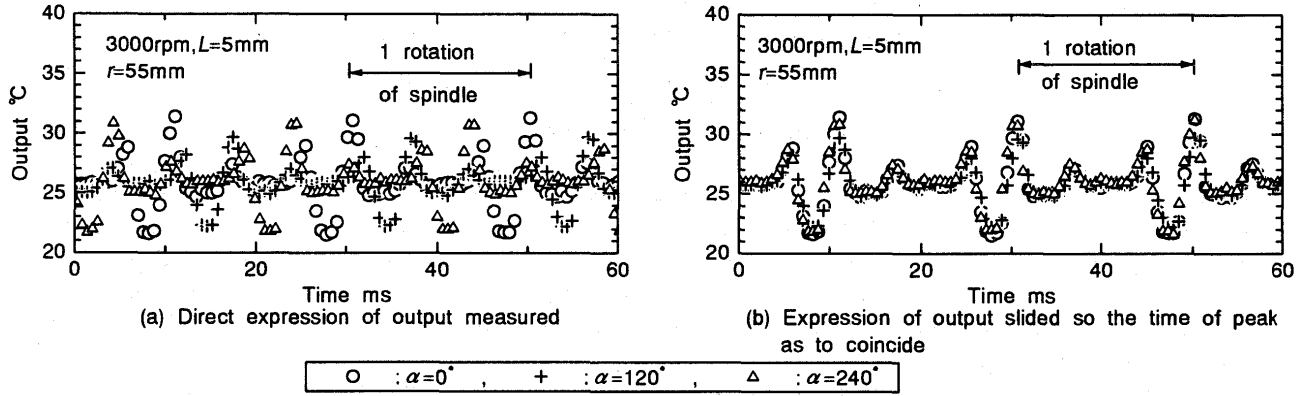


Fig.2 Fluctuation of output accompanied with spindle rotation

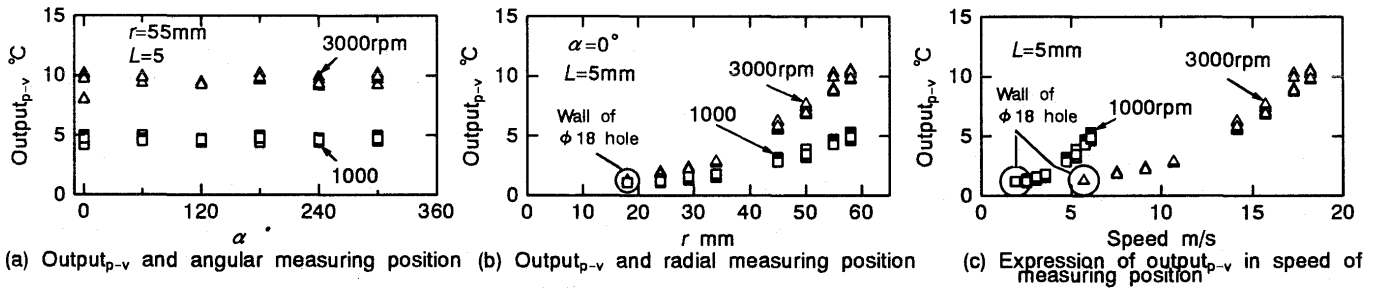


Fig.3 Relation between output $p-v$ and measuring position

点である。この測定点は回転体側ではないので、市販の温度測定システム（サーモダックE、分解能 0.1°C）と熱電対を用いて温度を測定した。

3. 実験とその結果

3.1 計測可能時間の延長

前報¹⁾においては、10分の計測のうち電圧低下による温度変動が大きい6~10分を除き、計測可能時間は約4分で実用性の観点から改良が必要であった。そこで、リチウムイオンバッテリー（公称容量 1350mAh、公称電圧 3.6V）に昇圧回路と定電圧回路を付加し、必要な電源電圧 5V を確保した。この状態で連続計測テストを行い、約 22.5h の連続計測が可能であった。この間の 8ch 全体で計測した生データの総数は約 1.125×10^9 データであった。

3.2 主軸回転に伴う光テレメータシステムの出力変動

3.2.1 出力変動

図2 (a) は、熱電対を主軸の端面 $r=55\text{mm}$ の位置に設置し、熱電対の鉄-主軸接触点と主軸-コンスタンタン接触点の2接触点間の距離 $l=5\text{mm}$ 、3000rpm で回転中の主軸についての本研究のシステムの出力である。これらのうち $\alpha=120^\circ$ の出力の位相を 120° 進めたものおよび $\alpha=240^\circ$ の出力の位相を 240° 進めたものを、 $\alpha=0^\circ$ の

出力と一緒に同図 (b) に示す。3か所での測定出力が同一のパターンで変動し、変動波形は1回転当たり1回の周期で繰り返していることが分かる。この例では出力変動の振幅は約 10°C であるが、後に述べるように振幅は回転速度が速いほど大きくなる傾向が認められた。この出力変動は短周期の現象で、被測定物である主軸の温度はほとんど変化していないと考えられるので、なんらかの対策が必要である。

3.2.2 熱電対高温接点の設置位置の影響

現実的な対策を立てるため、まず、鉄-主軸接触点と主軸-コンスタンタン接触点の2接触点の間の距離 l を 5mm 一定とし、熱電対高温接点の位置が出力変動振幅に及ぼす影響を検討する。主軸端面上の $r=55\text{mm}$ とし、図1の α の影響を調べた結果を図3 (a) に示す。 α は出力変動振幅に影響を与えないことが分かる。

図3 (b) は熱電対の高温接点位置が半径方向に異なる場合の結果である。高温接点が外周にあるほど、また回転数が高いほど出力変動振幅が大きくなる。図中の Wall of $\phi 18\text{mm}$ は主軸中心線に沿う $\phi 18\text{mm}$ 貫通穴の壁の7か所における出力変動振幅を示している。 $\phi 18\text{mm}$ 貫通穴のいずれの場所においてもほとんど同一の変動振幅であった。図3 (c) は同図 (a), (b) の結果を、高温接点の回転速度を横軸に表示している。

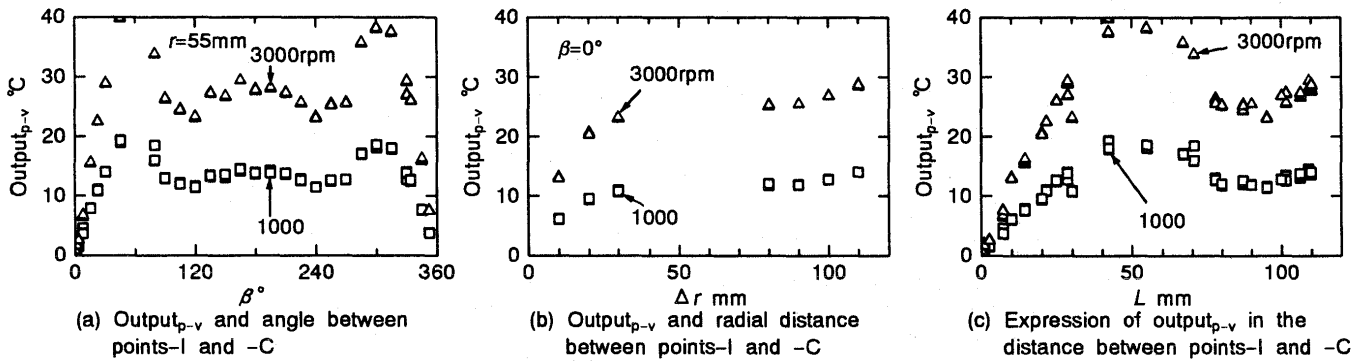
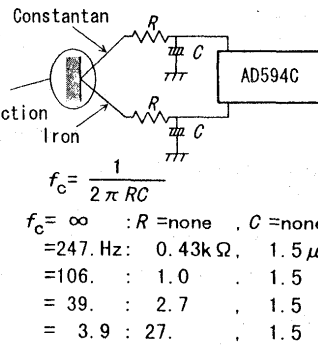


Fig.4 Relation between output_{p-v} and distance between contacting points-I and -C
L:Distance between the point-I of iron thermocouple wire contacting with spindle and another point-C of constant wire contacting with spindle

Table 1 Details of measuring condition

Type of hot junction	L5 mm	L0	L5D
No filter	ch1	ch2	ch3, 4
Low-pass filter (f _c =3.9Hz)	ch5, 7	ch6	ch8

_____:Iron wire of thermocouple
:Constantan wire of thermocouple
 ■:Shorted region
 ▨:Steel spindle



(a) Low-pass filter for thermocouple amplifier AD594C

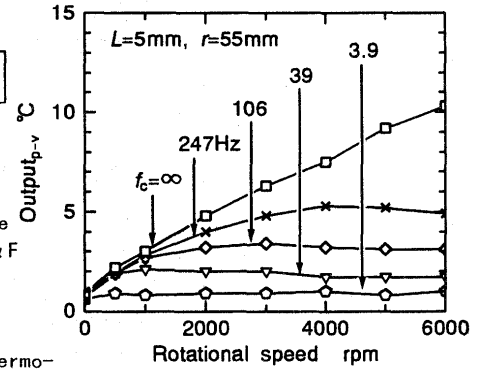


Fig.5 Effect of low-pass filtering on output_{p-v}

これらの結果から、高温接点の位置が主軸の外周になるほど、また単位時間当たりの回転数が高いほど出力変動振幅が大きい。しかし高温接点の回転速度だけをパラメータとして出力変動の振幅を整理できるわけではないことが分かる。主軸の長手方向での出力変動振幅の変化は認められない。

3.2.3 鉄-主軸接触点と主軸-コンスタンタン接触点の2接触点の相対位置の影響

ここでは、上記の2接触点の相対位置が出力変動振幅に及ぼす影響を検討する。熱電対の鉄線と主軸との接触点を基準として、コンスタンタン線と主軸との接触点の相対角度β (図1参照) が出力変動振幅に及ぼす影響を図4 (a) に示す。0° ≤ β ≤ 60° の範囲ではβが大きいほど出力変動振幅が大きくなるが、60° ≤ β ≤ 300° では比較的小さな変動振幅に落ち着く様子が見られる。さらに、300° ≤ β ≤ 360° (-60° ≤ β ≤ 0° に等価) では-60° に近いほど変動振幅が大きくなる事が分かる。

図4 (b) は r = 55mm, β = 0° において鉄線を主軸に固定し、β = 0° の直径上の異なる r 位置においてコンスタンタン線を主軸に固定した場合の出力変動振幅を示す。横軸は鉄-主軸接触点と主軸-コンスタンタン接触点の2接触点間の相対距離である。

図4 (a) と (b) を整理し、上記の2接触点間の距離を横軸として表現すると図4 (c) となる。図4 (a) におけるβ = 60°, 300° は同図 (c) における L = 55mm に相当する。L が増大して 55mm に近づくとともに出力変動振幅が増加し、最大となった後 L がさらに増加すると変動振幅が減少するのは次の理由によるものと考えられる。すなわち、図4 (b) からは2つの接触点間の距離が大きいほど出力変動振幅が大きく、図3 (b) からは高温接点の位置が外周部に近いほど出力変動振幅が大きいことが分かる。図4 (c) のように2つの接触点を結ぶ方向とは無関係に2つの接触点間の距離

L を考えると、L = 55mm までは2つの接触点を結ぶ直線は主に外周部の領域を通過しているため L が増加するとともに出力変動振幅が増大する。しかし、L がさらに増加すると2つの接触点を結ぶ直線は出力変動振幅が小さい内周部 (図3 (b) 参照) の領域を通過する割合が多くなるので、総合した結果として図4 (c) L = 55~110mm のように変動振幅が減少しほぼ一定値になるものと考えられる。

3.3 出力変動への対策

3.3.1 鉄-主軸接触点と主軸-コンスタンタン接触点の2接触点間の距離を短く

図4 (c) から明らかのように、上記の2接触点間の距離 L が短いほど本研究の光テレメータシステムの出力変動振幅は小さい。したがって有効な対策の1つは、鉄線およびコンスタンタン線が主軸とそれぞれ接触する位置 (かつ増幅素子 AD594C に最も近い位置) における両線間の距離 L を可能な限り短くすることである。この方法のうち鉄線とコンスタンタン線が直接接触する場合 (L = 0mm, 表1参照)、出力変動振幅は約 0.4~0.7°C (各チャンネルの連続した測定データ 500 個の (最大値-最小値)) となる。但し、この場合の測定出力は鉄-コンスタンタンの接触点の温度であって、必ずしも被測定物の温度ではない。従って、被測定物の温度と熱電対高温接点との温度に時間遅れや温度差がないように注意する必要がある。この対策は、熱電対高温接点付近の状況を目視などにより確認できる場合には、現実的に有効な方法であろう。

3.3.2 ローパスフィルタの設置

3.4 節のようにベアリングインナレース内面の温度を測定する場合、もし鉄線とコンスタンタン線を溶接またははんだ田付けし、これをインナレース内面に押しつけるとすれば、インナレース内面と熱電対高温接点との接触面積は固体同士の接触であり通常極めて小さいので、これを通過する熱量が小さくなり、レース内面と熱電対

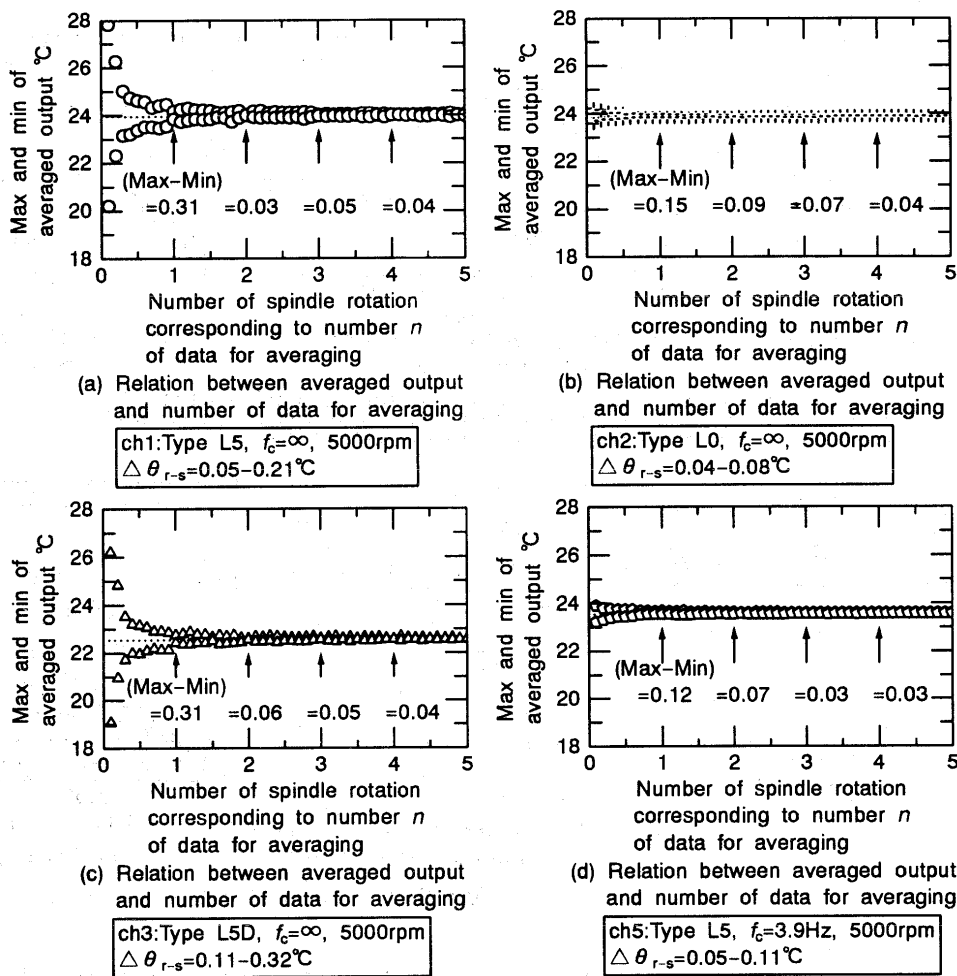


Fig.6 Accuracy of averaged output and measuring conditions

$\Delta \theta_{r-s}$: Difference between averaged outputs of 500 data under spindle rotation and stop

高温接点の間に温度差や時間遅れを生じやすいと考えられる。すなわち、測定により得られる温度は高温接点のそれであるが、レース内面のそれとは異なることが予想される。そこで、鉄線と主軸の接触点および主軸とコンスタンタン線の接触点の2つの接触点を有する回路²⁾を採用する必要がある。この場合の対策として、本項では一次ローパスフィルタの効果を検討する。図5 (a) に示す4種類のフィルタの遮断周波数は、回転ヘッドに収納する体積ができるだけ小さくなるよう、コンデンサは同一とし抵抗を変えることにより設定した。半径 $r = 55\text{mm}$ において、上記の2つの接触点間の距離 $l = 5\text{mm}$ の条件で得られた結果を図5 (b) に示す。主軸の回転速度が大きい場合ほど、またフィルタの遮断周波数 f_c (-3dB) が小さいほどフィルタの効果が著しいことが分かる。

3.3.3 データの平均化処理

本研究の光テレメータシステムで計測した生データは、 $l = 0\text{mm}$ で約 $0.4 \sim 0.7^\circ\text{C}$ 出力が変動している。また、 $l = 5\text{mm}$ でローパスフィルタ f_c を用いた場合には、約 1°C (図5 (b) 参照) 出力が変動している。そこで、リアルタイムでの利用を目的として、計測した生データの平均化処理が出力変動振幅に及ぼす影響を検討する。生データから連続する n 個のデータを抽出し、平均値を算出する。さらに、続く n 個のデータを抽出し平均値を算出する。この操作を繰り返して得られる平均化した出力の最大値と最小値を図6に示す。横軸は上記の生データ n 個をサンプリングする間に主軸が何回転するかを表示している。例えば 5000rpm の場合、 $n = 21$ データが主軸の1回転に

相当する。図6 (a), (b), (c), (d) のいずれにおいても、平均化のデータ数が増えると、平均化した出力が全データの平均値 (図中に水平な破線で表示、500 データ/ch の平均値、5000rpm では主軸 24 回転に相当) に収束している。また、図6 (a), (c) に見られるように、整数回転分のデータの平均値を用いると、最大値と最小値の差が急に小さくなることが分かる。図6 (a) は熱電対高温接点がタイプ L5 (表1参照)、ローパスフィルタなしの場合を示す。24 回転分に相当する回転中の500 データの平均値とその直後に主軸を停止させた状態で計測した500 データの平均値との差 $\Delta \theta_{r-s}$ がやや大きい。図6 (b) はタイプ L0、ローパスフィルタなしの場合である。全体的に図6 (a) に比べて、最大値と最小値の差が小さいことが分かる。これは、高温接点となる2つの接触点の距離を極めて小さくする対策 (3.3.1 項、図4 (c) の $l = 0$ の場合に相当) によって、図2の出力変動振幅が小さくなり、その結果図6 (b) の平均化した出力の変動振幅も減少したことによるものである。さらに、 $\Delta \theta_{r-s}$ も 0.08°C 以下となっている。図6 (c) はタイプ L5D、ローパスフィルタなしの場合の結果である。図6 (a) の場合とほぼ同じ結果であり、熱電対線が主軸とそれぞれ接触する位置 (かつ増幅素子 AD594C に最も近い位置) における l が重要であることが分かる。図6 (d) はタイプ L5 であるが、 $f_c = 3.9\text{Hz}$ のローパスフィルタを用いた結果である。 $\Delta \theta_{r-s}$ が 0.11°C 以下となっている。図6の結果から、計測した生データに対し主軸の整数回転分の平均値を連続的に算出して利用する方法が効

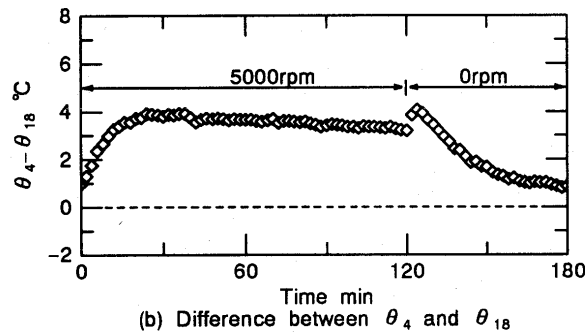
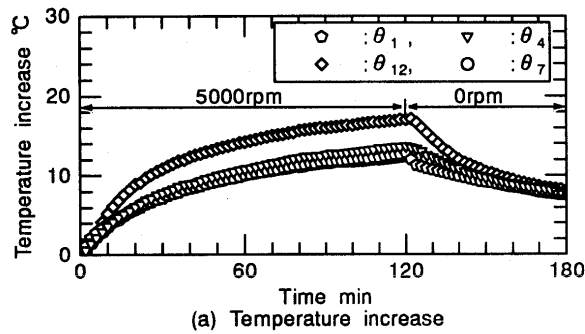


Fig.7 Temperature difference between inner-race and outer-race of rolling bearing (Continuous running with jacket cooling)

果的であると言える。

3.4 ベアリングインナレース内面の温度測定、インナレース内面とアウトレース外面の温度差

ベアリングの予圧変化や焼付きに関連して、重要な情報と考えられるインナレースの温度を測定する。第2章で詳細に述べた要領で、表1のL5 (ただし、 $L \leq 3\text{mm}$) タイプの高温接点を実現している。 $f_c = 3.9\text{Hz}$ のローパスフィルタを設置するとともに、1回転分のデータの平均化を行っている。図7にインナレースの温度上昇 $\theta_1, \theta_4, \theta_7$ を示す。 θ_{12} はビルトインモータ中央部の軸芯貫通穴壁の温度上昇である。別に行ったすべての実験においても、 θ_{12} が最も温度上昇が高いことが分かった。これはモータが熱源の1つであるにもかかわらず、周囲への伝熱・放熱の経路を十分には確保できない構造になっているためであり、ビルトインモータ式主軸の温度や熱挙動を検討する場合にはモータにも留意する必要があることを示している。同図(b)はベアリングの予圧変化に関連すると考えられるインナレース内面とアウトレース外周の温度差を示す。主軸回転中はジャケット冷却を行い、停止指令と同時に冷却ポンプをOFFとした。主軸回転中はほぼ一定の温度差になっている。主軸停止(120min)の直後に温度差が約1°C上昇するのは、 θ_4 がゆっくりと温度低下するのに比べて、 θ_{18} はハウジングへの伝熱経路の断面積が大きくその熱容量も大きいので温度低下が急速であることによるものと考えられる。

図8はジャケット冷却用ポンプをOFFとした条件での結果を示す。冷却していないので図8(a)に示す温度上昇がいずれも、図7(a)に比べて大きい。しかし、図8(b)のインナレースとアウトレースの温度差は、図7(b)に比べて小さく、また時間とともに減少する様子が見られる。これはモータのステータにおける発熱が、ロータの発熱に比べて大きいことによるものと考えられる。

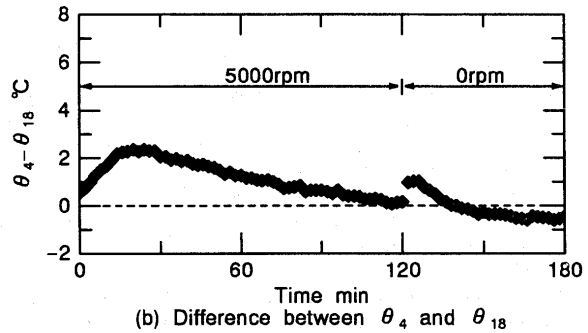
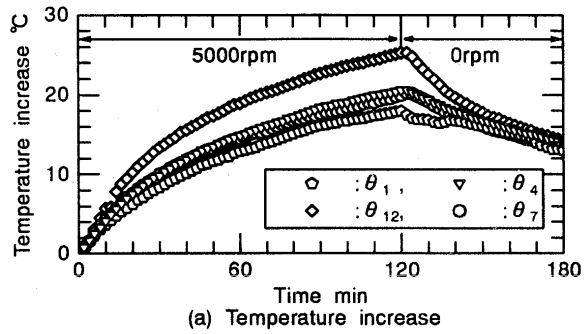


Fig.8 Temperature difference between inner-race and outer-race of rolling bearing (Continuous running without jacket cooling)

4. 結 論

光テレメータシステムを実用的なシステムとするための改良を行い、以下の結論を得た。

- (1) 実用的な計測時間を実現した。
- (2) 熱電対高温接点の主軸に導通している状態では、測定点の温度が変動していないにもかかわらず、主軸回転に伴い出力が変動する。
- (3) この場合にも誤差が0.1°C以下の計測精度を実現した。このために、以下の対策が有効である。
 - ・熱電対高温接点における2種類の熱電対素線と主軸との接触点(2接触点)間の距離を短くする。
 - ・ローパスフィルタを用いる。
 - ・主軸の整数回転分のデータの平均値を用いる。
- (4) 上記の対策を施したシステムを用いて、ベアリングインナレースの温度を測定した。

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。インナレース内面の温度測定用穴の位置を測定するため、硬性鏡をオリンパス販売(株)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、4年次学生として研究に協力していただいた横山幸夫君に感謝します。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 棚沢一郎, 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, 養賢堂, (1985) 22.