



回転体におけるひずみゲージ出力の光テレメータリング*

横山和宏** 佐藤正範*** 鈴木孝昌†

Optical Telemeter System of Strain-gauge Output in Rotating Object

Kazuhiro YOKOYAMA, Masanori SATO and Takamasa SUZUKI

This paper deals with the optical telemeter system of strain-gauge output in rotating object. Bridge circuit composed of strain-gauges is connected to an amplifier and the output of amplifier is A/D converted according to the control series generated by a one-chip micro-controller, and the A/D result of serial data series is fed to LED on rotating object and sent as the optical data series. The optical data series is received by PD on stationary head, and the serial PD output is converted to parallel datum and inputted to personal computer. Tensile force acting on the sensing plate based upon the centrifugal force due to the spindle rotation is measured by the strain-gauge and the optical telemeter system. Theoretical tensile force is calculated. It is confirmed that the measured force coincides well with the theoretical force. This system has the function of quick-input of known-strain.

Key words: optical telemeter system, strain-gauge output, rotating object, A/D conversion, LED, PD, personal computer, tensile force, centrifugal force, known-strain.

1. 緒 言

従来から、回転軸に作用する諸量のテレメータ技術が開発されてきた。近年の工作機械主軸の高回転数化および各種機器回転軸の高速度に伴って、テレメータ技術がますます重要になると考えられる。

古くから用いられているスリップリングによる方法¹⁾²⁾には、信号へのノイズ重畳とリングやブラシの磨耗および交換という、接触に基づく不可避の問題点がある。FM テレメータ³⁾はかなり用いられているが、外部の電磁場によるノイズへの対策のため周波数変調の信号処理が必要であり、高価である。また、回転体において、アナログ信号を周波数変調した結果を LED (発光ダイオード) に供給することにより、変調された周波数の光信号として伝送するシステムも報告⁴⁾されている。回転体上のアナログ電圧の高低を電磁気の強弱信号として送出し、これによる電磁誘導現象を利用して受信したあと復元する方法により外部に伝送するシステムも報告⁵⁾されている。

回転体のひずみ出力を、LED と PD (フォトダイオード) を用いて外部に伝送するテレメータシステム⁶⁾⁷⁾が報告されたが、測定チャンネル数は 1 チャンネルのみであった。また、電源が鉛蓄電池で大きかったので、高回転速度の場合には、回転側に設置する適切な電源がないという問題点があった。即ち、実用性の観点から、電源の小型化とチャンネル数の増加とが必要と考えられる。そこで、著者らの一部は 8 チャンネルで、リチウムイオン 2 次電池を用い 22.5hr 測定可能なシステム⁸⁾⁹⁾について報告した。さらに、ワンチップマイクロコントローラを用いたシステム^{10)~12)}では、回転ヘッドのさらなる小型化と省電力化を実行した。また、回転側における消費電力が小さくなったので、非接触給電を実現した。

ここでは、回転体の温度を測定し、その情報をデジタル化して非接触で外部に伝送するために開発した光テレメータシステム¹⁰⁾¹¹⁾を、回転体におけるひずみゲージ出力の光テレメータリングに拡張したシステムについて報告する。文献⁶⁾で報告されているように、テレメータで得られる測定値が基準測定値に比べ約 15%小さかったという問題点についても検討した。

2. ひずみゲージ出力の光テレメータリング

2.1 実験装置と測定システム

ひずみゲージ出力の光テレメータシステムを図 1 に示す。自己温度補償型の箔ひずみゲージを検出部に貼り付け、ひずみを検出するためブリッジ回路を構成する。この回路を市販の増幅器 (株)共和電業製 HSC-10B, HSC-20B) に結線している。増幅器の出力はフルスケールが約 $\pm 2V$ のバイポーラである。回転側回路の電源は非接触給電¹¹⁾¹²⁾により供給し、整流・平滑化し $\pm 5V$ とした電源を使用している。測定したところ、回転体側における消費電力は $5V \times 28.7mA$ であった。増幅器の出力を A/D コンバータ MAX186 により A/D 変換する。チャンネル番号を含む変換指令は、ワンチップマイコン PIC16F84 により生成している。A/D 変換の結果として得られるシリアルなデジタルデータを回転体上の LED に供給し、この LED から光学式に送信する。この信号を静止ヘッドの PD で受信した後、シリアル・パラレル変換し、プリンタポートから PC に入力している。PC 内で遮断周波数 1Hz のデジタルフィルタリング¹⁰⁾を行い、引張力や曲げモーメントに変換している。

図 2 は使用した実験装置を示す。主軸の前端面にセンサ板を固定し、センサ板の外周に同一質量の円弧形状の重り 4 個を固定している。重りと中心部の間は厚さ 5mm × 幅 30mm になっており、ここに 2 軸直交型のひずみゲージを接着している。1 枚のひずみゲージには、直交する 2 個のゲージが含まれ、その中の 1 個は図 3 (a) の $\theta = 0^\circ$ に平行に、残りの 1 個は

* 原稿受付 平成 16 年 1 月 21 日

** 正 会 員 新潟大学工学部 (新潟市五十嵐 2 の町 8050 番地)

*** 学生会員 新潟大学大学院

† 新潟大学工学部

回転体におけるひずみゲージ出力の光テレメータリング

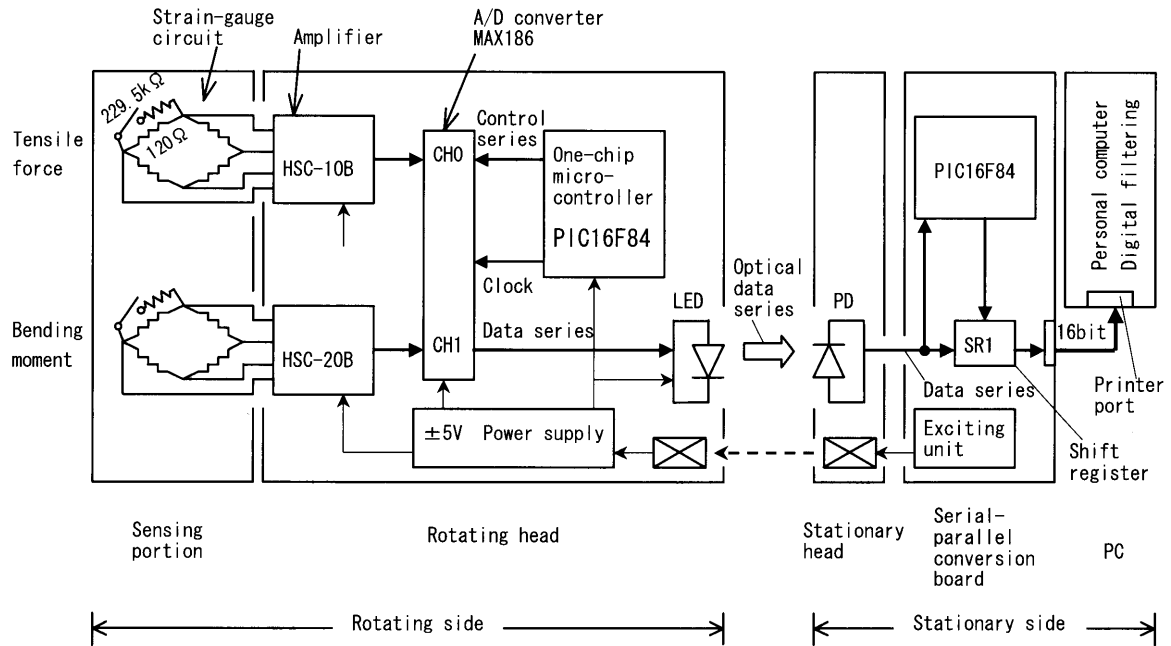


Fig. 1 Optical telemeter system of strain-gauge output in rotating object

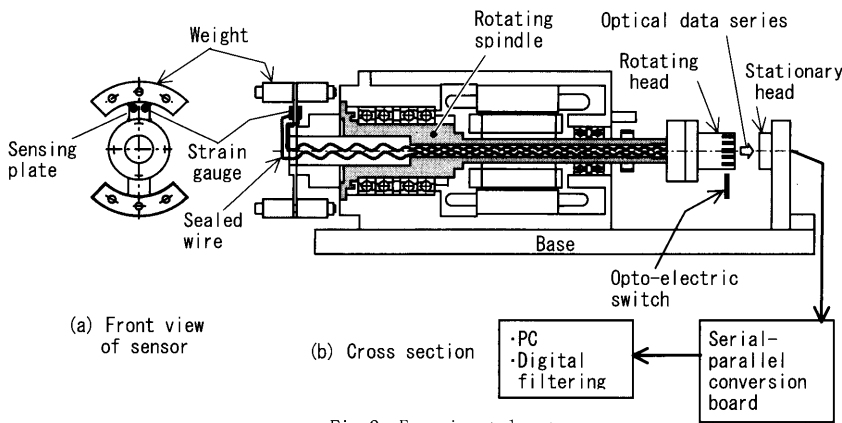


Fig. 2 Experimental set-up

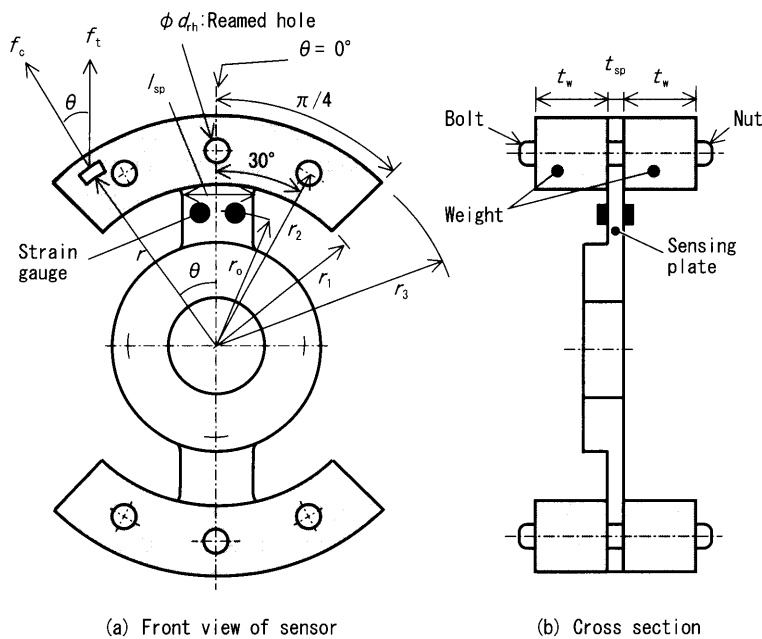


Fig. 3 Tensile force by centrifugal force

$\theta = 90^\circ$ に平行に配置されている。センサ板の表裏に接着した 2 枚のひずみゲージ (計 4 個のゲージ) を用いて、引張力を測定するブリッジ回路 (図 1 参照) を形成する。同様に、センサ板の表裏に接着した別の計 4 個のゲージを用いて、曲げモーメント用のブリッジ回路も形成している。図 2(b)に示すように、ブリッジ回路から、回転ヘッド内のひずみゲージ用アンプまでは、シールド線により主軸貫通穴の内部を經由して配線している。同時に主軸の回転速度を測定するため、回転ヘッドの外周円筒面の全周を 32 区画に等分割し、1 区画飛びにマジックを塗った非反射部とそれらに挟まれた反射部を設ける。図 2(b)に示すように、非反射部と反射部とを光ファイバ式光電スイッチで検出し、その信号を FV 変換してパソコンに入力している。

2.2 遠心力に基づく引張力の理論計算

本研究の光テレメータリングの測定結果と比較する基準として、作用する遠心力の影響を理論計算する。図 3 に示すように、遠心力 f_c は半径方向に作用するが、センサ板に接着した 2 軸直交型のひずみゲージは、そのゲージ軸が $\theta = 0^\circ$ および 90° 方向であるように接着しているため、ブリッジ回路の出力は上記遠心力 f_c の $\theta = 0^\circ$ 方向成分 f_t の合計に相当する。この合計引張力は式(1)で表される。式(1)の 1 番目の大括弧の項は、図 3 中の外周部に固定した重りの中、ひずみゲージを貼り付けた側の 2 個の重りによる遠心力の $\theta = 0^\circ$ 方向成分の合計として求めた引張力である。重りには直径 12.5mm の固定ボルト用のリーマ加工による穴があいている。これに相当する作用力を差し引くため、負の集中質量が穴中心位置に作用するものとして計算した。重りの密

$$F_t = \sum f_t = \left[\begin{array}{l} 4\rho_w t_w \omega^2 \int_{r_1}^{r_3} \frac{\pi}{4} r^2 \cos\theta d\theta dr \\ -\frac{\pi}{2} \rho_w d_{rh}^2 t_w r_2 \omega^2 (1 + 2 \cos 30^\circ) \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} 2\rho_{sp} t_{sp} \omega^2 \int_{r_1}^{r_3} \frac{\pi}{4} r^2 \cos\theta d\theta dr \\ -\frac{\pi}{4} \rho_{sp} d_{rh}^2 t_{sp} r_2 \omega^2 (1 + 2 \cos 30^\circ) \end{array} \right] + \left[m_{bn} r_2 \omega^2 (1 + 2 \cos 30^\circ) \right]$$

$$+ \left[\begin{array}{l} 2\rho_{sp} t_{sp} \omega^2 \int_{r_0}^{r_1} \frac{\pi}{4} \sin^{-1} \left(\frac{t_{sp}}{2r} \right) r^2 \cos\theta d\theta dr \\ \dots \dots \dots (1) \end{array} \right]$$

$$= \left[\begin{array}{l} 4\rho_w t_w \omega^2 \frac{1}{3\sqrt{2}} (r_3^3 - r_1^3) \\ -\frac{\pi}{2} \rho_w d_{rh}^2 t_w r_2 \omega^2 (1 + \sqrt{3}) \end{array} \right] + \left[\begin{array}{l} 2\rho_{sp} t_{sp} \omega^2 \frac{1}{3\sqrt{2}} (r_3^3 - r_1^3) \\ -\frac{\pi}{4} \rho_{sp} d_{rh}^2 t_{sp} r_2 \omega^2 (1 + \sqrt{3}) \end{array} \right] + \left[m_{bn} r_2 \omega^2 (1 + \sqrt{3}) \right] + \left[\frac{1}{2} \rho_{sp} t_{sp} \omega^2 (r_1^2 - r_0^2) l_{sp} \right] \dots \dots \dots (2)$$

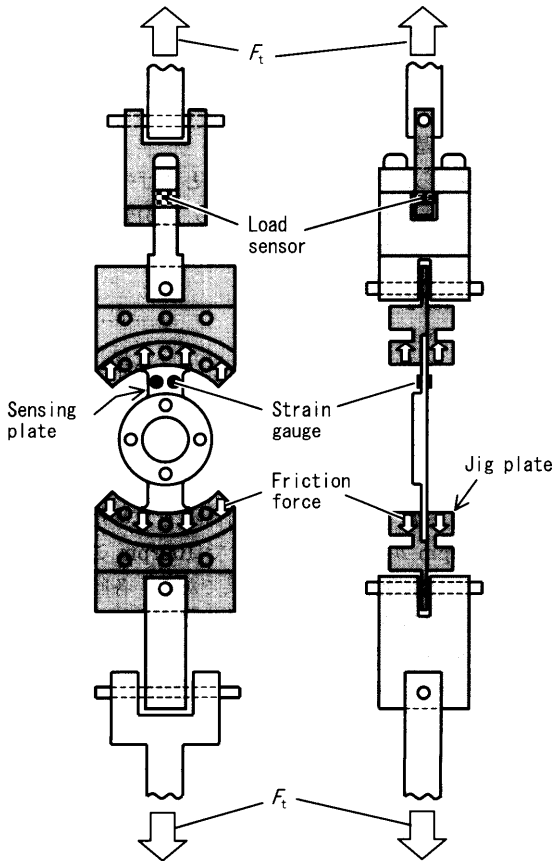
$$= 28.6 \times 10^{-7} N^2 \dots \dots \dots (3)$$

ただし,

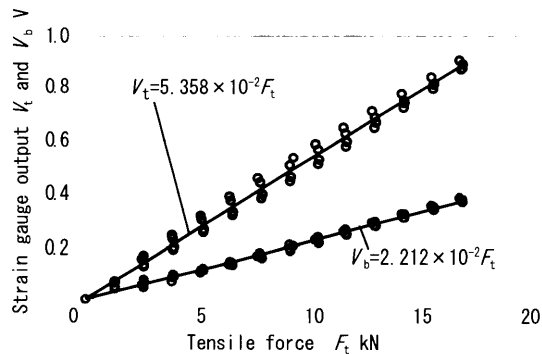
- d_{rh} : (= 12.5mm) ボルト穴の直径
- m_{bn} : (= 133g) (ボルト+ナット) 1個分の質量
- r_1, r_3 : 重りの内側の半径 (= 72.15mm), 外側の半径 (= 102.15mm)
- t_w, t_{sp} : 重りの厚さ (= 51.43mm), センサ板の厚さ (= 5mm)
- ρ_w, ρ_{sp} : 重りの密度 (= $7.098 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$), センサ板の密度 (= $7.83 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$)
- F_t : 遠心力 f_c に基づく引張力 f_t の合計 (kN)
- N : 回転数 (rpm)
- r : 半径
- l_{sp} : (= 30mm) センサ板のひずみゲージ貼り付け部の幅
- r_0 : (= 57.5mm) ひずみゲージの貼り付け位置 (半径)
- r_2 : ボルト中心の半径位置 (= 87.15mm)
- θ : 角度
- ω : 回転体の角速度

度は実測の質量と寸法から求めた. 同様に, 式(1)の 2 番目の大括弧の項は, 上記の重りと重なり合うセンサ板の一部による $\theta=0^\circ$ 方向の引張力である. 式(1)の 3 番目の大括弧の項は, 重りをセンサ板に固定するボルトとナットによる引張力である. ボルトとナットの質量が固定穴の中心に集中質量として作用するものとして計算している. 式(1)の 4 番目の大括弧の項は, ひずみゲージを接着したセンサ板の幅 30mm の平行部のうち, ひずみゲージの中心から r_1 までの部分による引張力である.

式(1)を計算した結果, 式(3)を得た.



(a) Calibration set-up



(b) Calibration results

Fig. 4 Calibration of strain output for tensile force

3. 実験の結果

3.1 ひずみ出力の校正

3.1.1 引張力用ひずみ出力の校正

図 3 の実験装置が回転すると, 装置各部に遠心力が作用するが, 図中のセンサ板に接着したひずみゲージは $\theta=0^\circ$ 方向の引張力を検出するようにブリッジ回路を構成している. そこで, 引張力によるひずみ出力の校正を行った. その概要を図 4 に示す. 同図(a)のように引張力 F_t を加え, このときのひずみ回路の引張力用の出力電圧 V_t および曲げモーメント用の出力電圧 V_b を測定し, これらの関係を求める. アムスラー式引張試験機で引張力を作用させることにより, 水晶圧電型の小型ロードセンサに圧縮力が作用する構造になっており, このロードセンサの出力を引張力 F_t とした. センサ板に引張力のみを作用させるよう, センサ板の両端にはそれぞれ 2 個の自在継手を配置した構造になっている. また, センサ板をジグ板で挟み, 引張力がジグ板とセンサ板間の摩擦力として均等に作用するよう注意して校正実験を行った. すなわち, ジグ板を固定するボルトとセンサ板が接触しボルトにせん断力が働く状態では, センサ板の中央部におけるひずみが大きくなり, 中央部と異なる位置に接着したひずみゲージによる出力が小さくなる. これを防ぎ, 遠心力による引張力がセンサ板の断面に均等に作用している回転中の状態と同一の状態を得よう注意した.

回転体におけるひずみゲージ出力の光テレメータリング

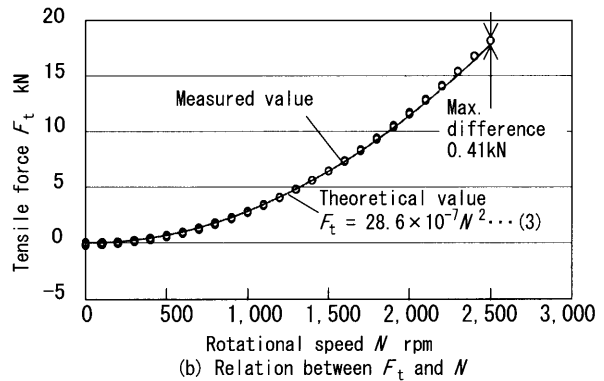
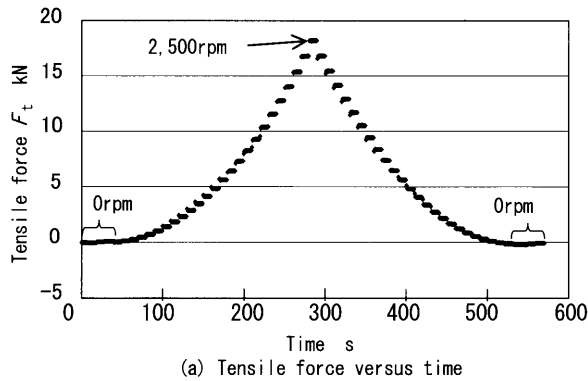


Fig.5 Tensile force F_t by centrifugal force under step-wise acceleration and deceleration

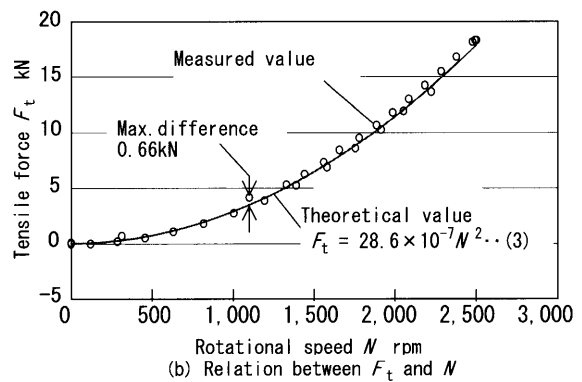
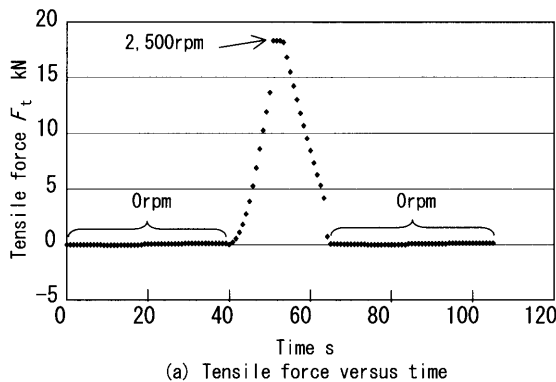


Fig.6 Tensile force F_t by centrifugal force under continuous acceleration and deceleration

加重と減重をそれぞれ 2 回実施し、得られたデータを図 4(b)に示す。加重・減重に対して出力電圧はヒステリシス状に変化した。これは図 4(a)のように自在継手を配置したにもかかわらず、加重・減重における引張試験機の姿勢の差が影響したものと考えられる。しかし、このヒステリシス状の変化は再現性が良く、近似直線の上下にほぼ均等に分布するので、それらのデータを直線近似して、ひずみゲージ回路の出力電圧と引張力との関係を求め、式(4)を得た。なお、曲げひずみを消去するようにブリッジ回路を構成しているが、センサ板の厚さが薄く完全な平面でなかったため、引張力による干渉効果が大きい。

$$\begin{Bmatrix} V_t \\ V_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 5.358 \times 10^{-2} \\ 2.212 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \{ F_t \} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、 V_t : 引張力用ひずみ回路の出力電圧[V]
 V_b : 曲げモーメント用ひずみ回路の出力電圧[V]
 F_t : 引張力[kN]

3.1.2 曲げモーメント用ひずみ出力の校正

センサ板を水平に固定し、質量が既知の重りをセンサ板の先端部に作用させて、曲げモーメント M_b とひずみ回路の出力電圧 V_b および V_t との関係を求めた。センサ板およびジグ板の自重の影響を消去するため、センサ板の表を上にした場合のデータと裏を上にした場合のデータのうち、重りをかけない状態におけるデータの平均値を求め、この平均値を基準として各データを整理し、曲げモーメントによるひずみ出力の校正を行った。その結果、式(5)を得た。なお、ここでは引張ひずみを消去するようにブリッジ回路を構成している。式(5)の係数を比較すると、曲げモーメント M_b が引張力用の出力電圧 V_t に及ぼす効果は十分小さいので、本研究の実験装

置において、引張力を精度良く測定できると考えられる。

$$\begin{Bmatrix} V_t \\ V_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4.731 \times 10^{-4} \\ 7.787 \times 10^{-2} \end{bmatrix} \{ M_b \} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 V_t, V_b [V] , M_b :曲げモーメント[N・m]

3.2 実験の結果

3.2.1 遠心力に基づく引張力

式(4)、式(5)から、センサ板に引張力と曲げモーメントが同時に作用している状態の出力電圧から、引張力と曲げモーメントを求める式(6)は、以下のように求められる。

$$\begin{Bmatrix} F_t \\ M_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 18.72 & -0.114 \\ -5.32 & 12.88 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_t \\ V_b \end{Bmatrix} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし、 F_t [kN] , M_b [N・m] , V_t, V_b [V]

図 2 に示す配置で、外周に重りを固定したセンサ板を主軸の前端に固定し、主軸を回転させる。このとき、両ひずみゲージ回路の出力電圧を光テレメータシステムで測定し、式(6)を適用して引張力 F_t と曲げモーメント M_b を求めた。図 5 は回転速度を、0rpm から 2,500rpm まで 100rpm ごとに階段状に加速、および減速した場合の結果である。各回転速度ごとに 10s の間、その速度を保持した状態で測定を行っている。この間のデータから、回転速度が変化中と考えられるデータは除外して整理した。同図(a)の 0rpm において、重りが上下に位置する場合と水平に位置する場合の引張力用ひずみ出力の平均値を引張力ゼロとして、データを整理した。結果を図 5(b)に示す。同図中には理論計算の結果も示している。測定データと理論計算値との最大差は 0.41kN(2.3%)であり、得られた測定データはいずれも理論計算値に極めて近いことが分かる。

図 6 は、回転速度を 0rpm から 2,500rpm まで連続的に加

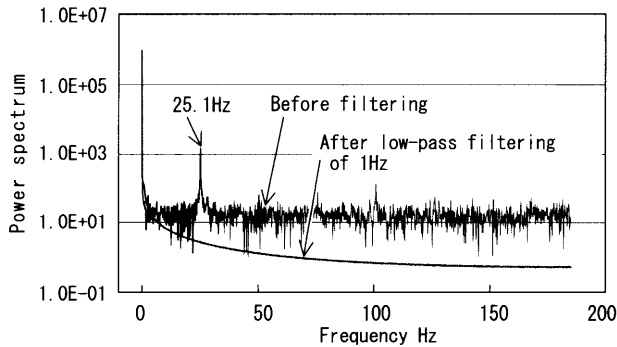


Fig.7 Power spectrum of the strain output for tensile force F_t under $N=1,500\text{rpm}$

速し、その後減速した場合の結果である。図3に示すように、センサ板が薄いため、急激な加速・減速を避けるため、モータの出力を通常の場合の15%に制限して実験を行った。図6(b)に示すように、得られた測定データはいずれも理論計算結果に近いことが分かる。しかし、図5(b)に比べ測定データと理論値との一致度がやや悪いのは、連続的に加減速し、2チャンネル分の出力電圧と回転速度を逐次サンプリングしているため、データ間のサンプリング時刻がずれていることによるものと考えられる。

以上の結果から明らかなように、本研究の光テレメータシステムにおいては、測定値が基準値に比べ約15%小さいという問題点⁶⁾もないことが分かる。したがって、図5(b)の結果から、この光テレメータシステムの測定精度は2~3%であると考えられる。

本研究では、引張力用のチャンネルと曲げモーメント用のチャンネルの各データを交互に繰り返しサンプリングしている。同一チャンネルのサンプリングレートは650Hzであり、パソコン内で遮断周波数1Hzのローパス・デジタルフィルタリング¹⁰⁾(パワースペクトル特性の2次IIRデジタルフィルタ¹³⁾)を行っている。図7は、主軸回転速度1,500rpmにおける測定データについて、デジタルフィルタリングを行ったデータのスペクトル分析結果とフィルタリング前のデータのスペクトル分析結果を示している。フィルタリング前のスペクトル分析においては、主軸回転速度に近い25.1Hzのピークが大きいですが、フィルタリング後の分析においてはこのピークがなく、また全体的にスペクトルが減少していることが分かる。デジタルフィルタリングは、得られたデータに対しパソコン内のプログラムで、リアルタイムで実行できるので、ハードウェアなかでも回転ヘッドを小型化することにも有効であるとともに、遮断周波数の変更にも柔軟に対応できるので、便利である。

3.2.2 既知ひずみの入力機能

本研究のシステムにおいては、ひずみゲージ回路の出力電圧をA/D変換し、変換の結果を光学式に送信・受信した後、この受信データをパソコン内で式(6)により引張力と曲げモーメントに換算している。上記のA/D変換においては、回転ヘッド内のPICマイコンにインストールするアセンブラプログラムにより、変換時のゲインを設定している。また、式(6)による換算もプログラムにより実行される。したがって、作用力から式(6)による換算結果までのゲインや係数が正常であることを、容易に確認できる機能を備えたシステムであることが

望ましい。この問題点への対策の1つとして、既知質量の重りを吊り、最終結果を確認または保存する方法が考えられる。しかし、本研究の場合のように、10~20kNを作用させることは現実には容易でない。そこで、必要に応じて、既知の作用力に相当する入力ひずみを簡単に入力し、式(6)の結果が正常であることを確認できると便利である。ここでは、図1に示すように、使用したひずみゲージの抵抗は120Ω、ゲージ率は2.09である。これに並列抵抗として設置した金属皮膜抵抗は229.5kΩであった。回転ヘッド上に露出させた端子を例えばピンセットで短絡することにより、並列抵抗をONにする。これによる抵抗変化に等価なひずみは、式(7)で計算できる。なお、実測により、本研究のシステムでは、 250×10^{-6} のひずみは5.66kNの引張力に相当することが分かった。

$$\varepsilon = \frac{\left\{ \frac{\Delta R}{R} \right\}}{K_s} = \frac{\left\{ \frac{120 - \frac{120 \times 229.5k}{120 + 229.5k}}{120} \right\}}{2.09} = 250 \times 10^{-6} \dots \dots \dots (7)$$

ただし、 ε ; 既知ひずみ、 ΔR ; 並列抵抗ONによる抵抗変化、 R ; ゲージ抵抗、 K_s ; ゲージ率

4. 結 言

光テレメータシステムを回転体のひずみ測定に適用した結果、遠心力に基づく引張力を光テレメータシステムで測定し、2~3%の測定精度が得られていることが分かった。また、既知の作用力に相当するひずみの入力機能を備えている。

参 考 文 献

- 1) 米山猛, 畑村洋太郎: 圧延ロール表面の実働応力・温度測定(第4報 熱間圧延における実働応力・温度測定), 日本機械学会論文集(C編), 56, 527(1990)1935.
- 2) 例えば, RBE-A/E スリッピング, (株)共和電業 Web カタログ.
- 3) 例えば, 温度測定テレメトリシステム, (株)立山電子 Web カタログ.
- 4) 北條春夫, 平田賢輔, 櫻井欣夫: 光を用いた非接触スリッピングによる回転体の振動計測法, 精密工学会誌, 62, 6(1996)835.
- 5) 大河内禎一, 伊藤志成: 機械の回転軸上における微小な異常状態の信号検知・伝送システム, 日本機械学会誌, 97, 912(1994)961.
- 6) 池崎八生, 竹内芳美, 坂本正史: 光伝送を使用した回転工具の切削抵抗測定(第2報 装置の改良と切削抵抗の解析), 精密工学会誌, 53, 5(1987)755.
- 7) 朝比奈奎一, 猪野欣也, 宮川勝雄, 平塚尚一: エンドミル用切削動力計の開発とその利用, 設計工学, 29, 7(1994)265.
- 8) 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 計測可能時間の延長・熱電対高温接点の主軸に導通している場合の計測), 精密工学会誌, 64, 9(1998)1355.
- 9) 横山和宏, 遠藤覚, 鈴木孝昌, 松平雄策: 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), 精密工学会誌, 65, 1(1999)150.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 横山和宏, 永井豊, 鈴木孝昌: 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3報 円筒面からのデータ伝送と非接触給電), 精密工学会誌, 69, 11(2003)1600.
- 13) 三上直樹: デジタル信号処理プログラミング入門, CQ 出版(株)(1993)148.