

光ファイバセンサの示差熱計測への適用

木村 匡*, 秋元 修**, 坂口英志*,
高島 貢*, 野田健一***

Application of an optical-fiber sensor to differential thermal analysis

Tadashi Kimura, Osamu Akimoto, Hideyuki Sakaguchi, Mitsugu Takashima, Ken-ichi Noda

A novel differential thermal measuring system using optical fiber sensors is proposed. A Michelson interferometer composed of an optical fiber coupler is applied to maintain a thermally symmetrical configuration. An optical sensing fiber is connected to each output arm of the coupler and each fiber end is coated with aluminum to reflect the signal light. One of these fibers is wound around a cup containing a sample material and the other is wound around the other cup containing a reference material, for the purpose of sensing its temperature difference. In order to immune from fluctuations of the light source and the amplifier, a pseudo-heterodyne detection scheme is adopted and the phase difference proportional to the temperature difference between the cups can be extracted with good stability. A rotating-phase measuring circuit is proposed to measure over a wide dynamic range of phase difference. As a result, the temperature sensing sensitivity of $250\pi\text{rad/K}$ can be obtained.

First, in this paper, the advantages of the Michelson Interferometer using optical fiber couplers are mentioned. Next, a newly-developed pseudo-heterodyne detection scheme and a rotating phase measuring circuit designed for the system are described. Finally, the experimental results are shown and the errors of the system are discussed.

*東京農工大学工学部電子情報工学科：
東京都小金井市中町2-24-16 〒184
Division of Electronic and Information
Engineering, Tokyo University of Agriculture
and Technology：
2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo 184, Japan

**ソニー(株)：
東京都品川区北品川6-7-35 〒141
Sony Corporation
6-7-35 Kitashinagawa, Shinagawa-ku,
Tokyo 141, Japan

***拓殖大学工学部情報工学科：
八王子館町815-1 〒193
Department of Information Technology, Takushoku
University：
815-1 Tate-machi, Hachioji-shi 193, Japan

1. はじめに

光の干渉を利用すれば光の波長オーダーで長さや移動距離などが測定できるので、古くからこれらの精密測定に光の干渉が利用されてきた。近年、通信用に研究、開発された光ファイバやその関連部品を用いれば、光の干渉計が容易に構成できるので、各種物理量の計測にますます光の干渉が応用されつつある。特に光ファイバが持つ、無誘導性、耐腐食性、高絶縁性、可とう性、小型、軽量などの特長を生かせば、高感度で実用的なセンサが構成できるので、最近注目を浴びており¹⁾⁻⁵⁾、われわれの研究室でも研究を行っている⁶⁾⁻⁸⁾。一方、熱電対は熱測定に特に古くから用いられ、測定が自動化された今日ますます重要な役割を果たしている。しかし、熱電対は電磁誘導に弱く、耐腐食性も良くない。また、感度を上げるためには多数の熱電対を直列接続をしなければなら

ず、測定部の小形化には困難が伴う。

光ファイバは上述のような特長を持っているので、光ファイバをセンサとして用いれば、熱電対のこれらの短所を補うことができるだけでなく高感度化が期待できる。そこでこのような観点から、本研究では高感度示差熱計測を取り上げ、熱電対の代わりに光ファイバをセンサとして用いた示差熱計測システムを構成し、基礎的実験および理論的解析を行い、実用性を検討した。

本論文ではまず、本システムの光学系の構成とその原理を述べる。ここでは光ファイバカプラを用いたマイケルソン干渉計形およびマッハツェンダ干渉計形が示差熱計測に適することを述べるが、特に感度、構成の点でマイケルソン干渉計形が好適であることを示す。次に、光検波方式について触れるが、ここでは Kersey らが提案した擬似ヘテロダイン法⁹⁾に改良を加え、温度差に比例した位相差を安定に抽出する方法および本システムで用いる位相回転計測回路の構成について述べる。ついで、示差熱計測部のレスポンス、感度などについて述べ、最後に、本システムの実験結果を示し、誤差の検討などを加える。

2. 光ファイバ干渉計を用いた示差熱計測

光ファイバカプラを用いれば、光の干渉出力を容易に取り出すことができるうえ、光学系が簡素化でき、安定な干渉出力を得ることができる。また、示差熱計測のような、対称構造が要求される場合に好適な干渉計が構成できる^{10)~13)}。この章では示差熱計測に適した対称構造を持つ光ファイバマッハツェンダ干渉計および光ファイバマイケルソン干渉計を取り上げ、これらを光ファイバカプラで構成し、示差熱計測に適用する方式について検討する。

これらの干渉計から得られる干渉波形の強さは、分岐光路長差に比例するが、光源の強度や受光器の感度揺らぎの影響を受けやすく、大きなドリフトを引き起こすので、直ちに信号として利用するには不向きである。そこで、これらの変動を受けにくい位相を信号として利用する光ヘテロダイン方式の研究が進められている²⁾。この方式では、分岐光路の一方に AOM (音響光学変調器) などの周波数シフタを挿入し、周波数をシフトさせ干渉させたのち、そのビート波形から信号に比例した位相を取り出す方法が取られている。しかし、AOM は所望の周波数が得にくいうえ、光ファイバとの結合に適していないため、高精度の測定において十分な安定度を得るのに困難が伴う。そこで、本研究では PZT (ピエゾ圧電素子) 光変調器による外部光変調方式と擬似ヘテロダイン検波方式を併用して、光源の強度や受光器の感度揺らぎを受けずに、温度差に比例した位相差を安定に抽出す

る方式を適用している。

2.1 1 マイケルソン干渉計形示差熱計測方式

Fig.1 にマイケルソン干渉計形示差熱計測方式の構成図を示す。光ファイバカプラの入力側分岐 H_1 から入射したレーザ光は出力側の 2 分岐 H_3, H_4 に分岐し、それぞれ PZT 光変調器を介し、センシング部に伝搬する。センシング部はそれぞれ、分岐ファイバの先端部が周囲に巻き付けられた試料容器及び基準物質容器から成り立っており、センシングファイバは容器の周囲温度に比例して伸縮する。両分岐の先端面はアルミ蒸着が施されていて、これらの先端で反射した光は、再びカプラを通り入力側の他の分岐 H_2 に至り、混合されたのち、受光器でその干渉波形が検出される。光変調器の PZT 円筒には分岐ファイバが数回巻き付けられていて、互いに逆位相の正弦波電圧で駆動されている。

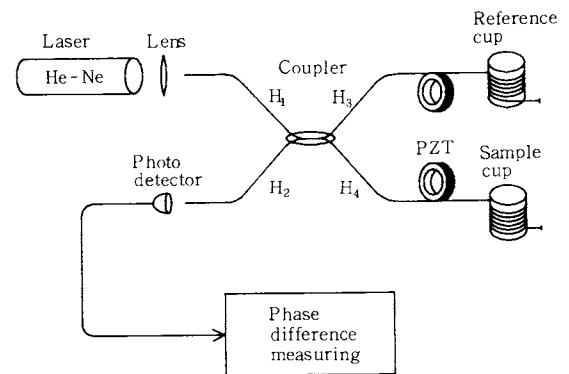


Fig.1 Michelson interferometer type differential thermal measuring system using an optical fiber coupler. The two output fiber arms of the coupler are wound around two cups respectively, one contains a sample and the other contains a reference substance. A PZT (piezo-electro transducer tube) optical modulator is used for the pseudo-heterodyne detection scheme.

今、PZT 光変調器を通過する光が、 $m_p \cos \omega_p t$ だけ位相変調を受けるものとすれば、分岐 H_3, H_4 を伝搬する光が一往復で受ける位相推移 ϕ_s, ϕ_r はそれぞれ、次式のように表される。

$$\phi_s = 2 (m_p \cos \omega_p t + \psi_s + \Delta\psi_s + \Delta\psi_d) \quad (1)$$

$$\phi_r = 2 (-m_p \cos \omega_p t + \psi_r + \Delta\psi_r + \Delta\psi_d) \quad (2)$$

ただし、 m_p 及び ω_p は PZT の変調指数及び変調角周波数、 ψ_s 及び ψ_r は測定開始時に光が分岐 H_3, H_4 をそれぞれ片道のみ伝搬するとき受ける初期位相推移とし、 $\Delta\psi_s$ 及び $\Delta\psi_r$ は各分岐センシング部の温度変化による

位相変化、 $\Delta\psi_d$ は各伝送路及びセンシング部の外乱による位相変化とする。従って、反射戻り光の強度をそれぞれ I_1 、 I_2 とすれば、受光器の干渉出力強度 P は次式のように与えられる¹⁴⁾。

$$P \propto I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi_s - \phi_r) \\ = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(4m_p \cos \omega_p t + 2\Delta\phi + 2\phi_0) \quad (3)$$

ただし、

$$\Delta\phi = \Delta\psi_s - \Delta\psi_r \quad (4)$$

$$\phi_0 = \psi_s - \psi_r \quad (5)$$

とする。測定開始時に両分岐の長さ及び温度が等しければ、 $\phi_0 = 0$ となり、式(3)の位相差 $\Delta\phi$ を検出すれば、 I_1 、 I_2 の変動を直接受けずに両容器の温度差に比例した位相差のみを抽出することができる。

2.2 マッハツェンダ干渉計形示差熱計測方式

Fig. 2 にマッハツェンダ干渉計形示差熱計測方式の構成図を示す。各センシング部を通り抜けた光を、他のもう1個の光ファイバケーブルを用いて、分岐 J_3 または分岐 J_4 に導き干渉を起こさせている。マイケルソン干渉計形の場合にはセンシングファイバおよび PZT 光変調器を光が往復するのに対して、この場合には片道しか通らないので、ケーブル分岐 J_1 及び J_2 の合流点での位相 ψ_s 及び ψ_r はそれぞれ次式のように表される。

$$\psi_s = m_p \cos \omega_p t - \psi_s + \Delta\psi_s + \Delta\psi_d \quad (6)$$

$$\psi_r = -m_p \cos \omega_p t + \psi_r + \Delta\psi_r + \Delta\psi_d \quad (7)$$

従って、干渉波形の強度 S_1 、 S_2 はそれぞれ次式のように与えられる。

$$S_1 \propto I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\psi_s - \psi_r) \\ = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2m_p \cos \omega_p t + \Delta\phi + \phi_0) \quad (8)$$

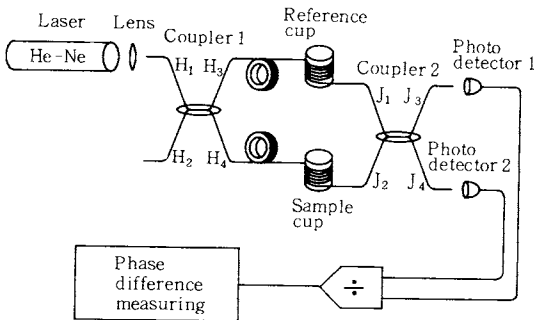


Fig.2 Mach-Zehnder interferometer type differential thermal measuring system using optical fiber couplers. This method requires less electronic circuit but two couplers are required.

$$S_2 \propto I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2m_p \cos \omega_p t + \Delta\phi + \phi_0) \quad (9)$$

マッハツェンダの場合は上述のように位相差が π 異なる2つの出力が取り出せるので、これらの差を取ることでより2倍の出力が得られることや、これらの交流分の比をとることにより光源の変動を受けない信号を直ちに得られるなど利点もあるが、位相感度はマイケルソン干渉計形と比べて同じセンシングファイバ長に対して1/2となる。また、光ファイバケーブルが2個必要で、構成がやや複雑となる。

3. 位相差計測回路

3.1 位相差抽出方法

本章では、干渉波形から温度差に比例した位相差を抽出する方法について述べる。2章で述べたように、示差熱計測にはマイケルソン干渉計形かマッハツェンダ干渉計形が適しているが、本研究では光学系が簡素で高感度測定に適しているマイケルソン干渉計形を用いることにした。

マイケルソン干渉計の干渉出力から、まず、互いに温度差に比例した位相差を持つ正弦波2信号を抽出する。そのために、本論文では改良を加えた擬似ヘテロダイン方式を適用する。Fig. 3 にこの擬似ヘテロダイン検波回路のブロックダイアグラムを示す。PZT 円筒に巻かれた光ファイバが伸びるときと縮むときとで、 $\Delta\phi$ の符号が逆になることに着目して、受光器の光干渉出力を PZT 駆動波形のピーク値でスイッチングし、半周期おきに2チャンネルに分ける。この処理は受光波形を PZT の駆

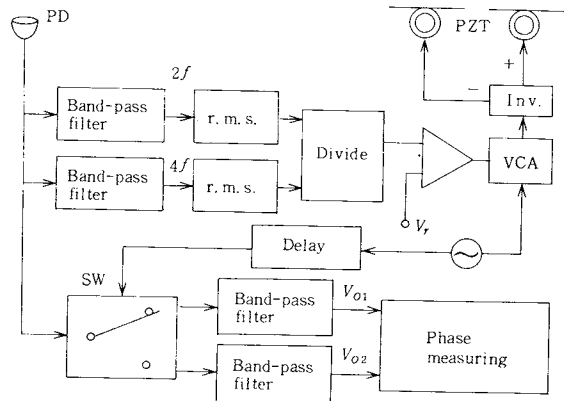


Fig.3 Newly-developed pseudo-heterodyne detection system. Two sinusoidal waveforms whose phase difference is proportional to the temperature difference are extracted here. A feedback control is used to keep the PZT modulation at a constant degree.

動波形の周期と等しい周期を持つ矩形波で変調したことに等しい。すなわち、干渉出力波形 P の交流分 P_a をベッセル関数を用いて次式のように表し (J_n を n 次第 1 種ベッセル関数, $n=0, 1, 2, \dots$ とする),

$$\begin{aligned}
 P_a &= K_a \cos(4m_p \cos \omega_p t + 2\Delta\phi) \\
 &= K_a \{ J_0(4m_p) \cos 2\Delta\phi \\
 &\quad + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \{ J_{2n}(4m_p) \cos 2\Delta\phi \cos 2n\omega_p t \\
 &\quad + J_{2n-1}(4m_p) \sin \phi \cos(2n-1)\omega_p t \} \} \quad (10)
 \end{aligned}$$

方形波を次式のように表せば,

$$V_s = \frac{1}{2} \pm \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2^n - 1} \sin(2n-1)\omega_p t \quad (11)$$

スイッチング処理は、上式の右辺第 2 項の符号を各チャンネルに対応させ ($P_a \times V_s$) の乗算を行うことに等しい。この出力信号から中心周波数 $2f_{pZ}$ のバンドパスフィルタを通して 2 次高調波成分のみを取り出せば、それぞれ次のような出力を得る⁹⁾。

$$\begin{aligned}
 V_1 &= K_1 \cos 2\Delta\phi \cos 2\omega_p t \\
 &\quad - K_2 \sin 2\Delta\phi \sin 2\omega_p t \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 V_2 &= K_1 \cos 2\Delta\phi \cos 2\omega_p t \\
 &\quad + K_2 \sin 2\Delta\phi \sin 2\omega_p t \quad (13)
 \end{aligned}$$

ただし,

$$K_1 = K_a J_2(4m_p) \quad (14)$$

$$K_2 = K_a \frac{8}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(2m_p) \frac{(-1)^n}{(2n+1)(2n-3)} \quad (15)$$

とする。ここで $4m_p = 2.82$ に選べば, $K_1 = K_2 = K_b$ となり式(12), (13)はそれぞれ次式ようになる。

$$V_{01} = K_b \cos(2\omega_p t + 2\Delta\phi) \quad (16)$$

$$V_{02} = K_b \cos(2\omega_p t - 2\Delta\phi) \quad (17)$$

ただし, K_b は, K_a 及び式(10)のベッセル級数展開の係数によって決まる定数である。これら 2 波形間の位相差 $4\Delta\phi$ を測定すれば K_b の変動, すなわち光源および受光器の強度変動の影響などを直接受けずに温度差が測定できることになる。このようにマイケルソン干渉計形示差熱計測方式では, 往復の光が利用されるので, センシング感度は, 同じ長さのセンシングファイバ長を持つマッハツェンダ干渉計などと比べて 2 倍になる。さらに, 擬似ヘテロダイン法により 2 倍の位相差が取り出されることになり, 高感度が得られる。Fig.4(a)に受光波形, Fig.4(b)にスイッチングにより 2 チャンネルに分けられた波形, 及び Fig.4(c)に受光波形に対する V_{01} , V_{02} の波形を示す。

以上の議論はすでに述べたように変調指数 $4m_p$ が 2.82 rad の時に成立する。変調指数がこの値から生ずれば, 高感度測定時には非線形歪による位相誤差が生じることになる。そこで, 本システムでは受光出力の第 2 高

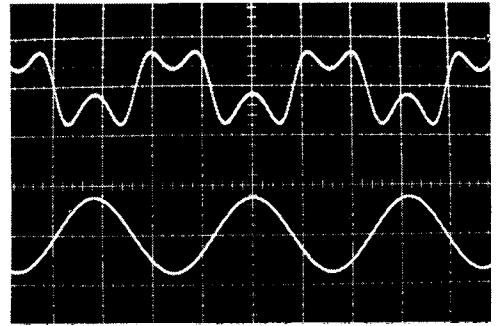


Fig.4(a) Photo-detector output waveform(upper side) and a PZT driving waveform(lower side).

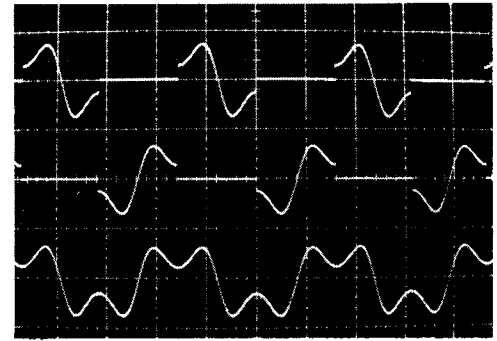


Fig.4(b) Waveforms separated into tow channels by an analogue switch SW (upper side), and the photo-detected output waveform (lower side).

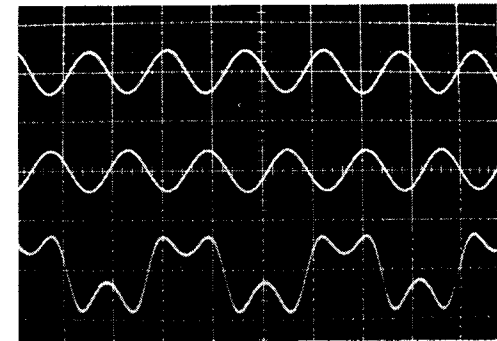


Fig.4(c) Band-pass-filtered waveforms V_{01} , V_{02} , (upper side) and the photo-detector output waveform (lower side)

調波の実効値と第 4 高調波の実効値の比から変調指数が求められることを利用して, この値を VCA (Voltage Controlled Amplifier) を介して PZT 駆動電圧にフィードバックし, 変調指数を常に一定に保っている¹⁵⁾。

3.2 位相回転計測回路

熱測定においては微小な熱量の測定と同時に十分大きな熱量を測定する必要が生じることがある。従って、位相差は0から 2π radの間を十分な分解能で測定すると同時に、数百 π radにも及ぶ広範囲な値(後に述べるように温度変化1K当り250 π radに相当する)を測定できるようにしなければならない。そこで、Fig.5(a)に示すような位相回転計測回路を設計・試作した。その動作原理の概略を述べる。

各フィルタから出力された2つの正弦波 V_{01} 及び V_{02} は、それぞれコンパレータにより方形波に整形されたのち、それぞれの波形の立ち上がりエッジが検出される。次に、RS フリップフロップにより一方の矩形波の立ち上がりから、これに対応した他方の矩形波の立ち上がりまでの区間、すなわち位相差に比例した幅を持つパルスが作り出される。次段の計数回路では V_{01} 、 V_{02} の周波数よりも十分高いクロック(本実験では12MHz)でこのパルス幅を計数し、位相差がパルス数として測定される。これらのタイムチャートを Fig.5(b)に示す。位相差が0から 2π radの範囲を越えれば、方向検出回路により位相差の増減を調べ、その方向を示す信号を出力する。これらの信号はパーソナルコンピュータにより処理された後 2π rad以内を示す $\Delta m\phi$ カウンタと、 2π radの単位を示す M カウンタの2種類のデータとして出力される。

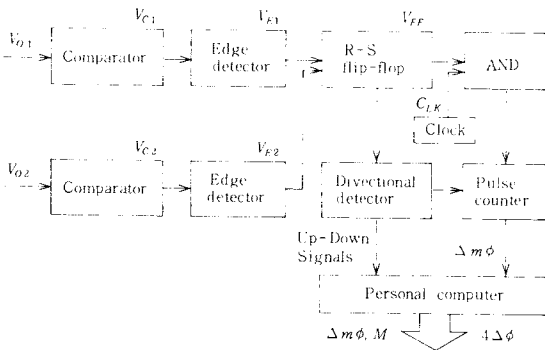


Fig.5(a) Rotating-phase measuring circuit, where the phase difference is measured continuously by counting intersection area of the two squared waveforms after digital-to-analog conversion, as examining the directions of the phase rotation.

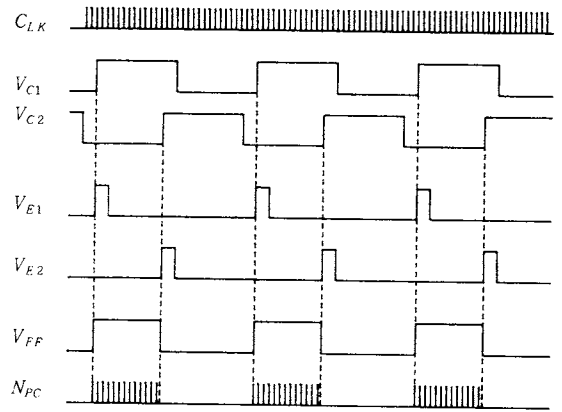


Fig.5(b) Time chart of each block output in the rotating-phase measuring circuit.

C_{LK} : Clock pulse to synchronize all the circuit.

V_{C1} , V_{C2} : Comparator output waveforms, which corresponds to the filtered waveforms with phase difference.

V_{E1} , V_{E2} : Outputs of the edge detectors, where the rising edges of the squared waveforms are extracted.

V_{FF} : Output of the R-S flip-flop, whose pulse width is proportional to the phase difference.

N_{PC} : Pulse groups counted by a counter, to be taken into a personal computer.

4. 測定実験及び検討

本実験の光学系構成図を Fig.6 に示す。2分岐の伝送路部及び PZT 光変調器はそれぞれ破線で示すように縦200 mm, 横310 mm, 高さ155 mm, 厚さ15mmの発泡スチロール製の断熱箱の中に対称的に納められている。各伝送路の途中には PZT 光変調器が挿入されている。PZT 円筒は直径35 mmで、その周囲には分岐ファイバ

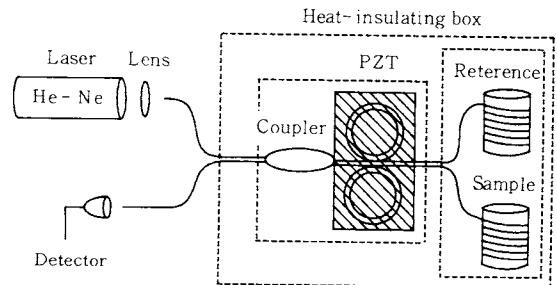


Fig.6 Configuration of the differential thermal measuring portion, where all elements are arranged symmetrically.

が5回巻き付けられていて、16 kHzの正弦波電圧で駆動されている。外部変調形マイケルソン干渉計を構成する場合は、1分岐にのみ変調器が挿入されるのが一般的であるが、ここでは対称性を得るため、互いに逆相の電圧で駆動されている。Fig. 7に示すようにセンシング部の試料容器および基準物質容器は、高さ20 mm、直径26 mm、厚さ0.5 mmのアルミ製のカップから成り立ち、それぞれの周囲に2 mの分岐ファイバが25回巻き付けられている。これらのカップは内径130 mm、高さ65 mm、厚さ4 mmのアルミ製円筒形ヒートシンクの内部に対称的に配置されている。センシング部及びヒートシンクは縦260 mm、横273 mm、高さ145 mm、厚さ15 mmの独立した発泡スチロール製断熱箱内に対称性を考慮して配置されている。これらの2個の断熱箱は、さらに縦570 mm、横710 mm、高さ420 mm、厚さ50 mmの発泡スチロール製の断熱箱に納められている。なお、光源には波長0.633 μm のHe-Neレーザを用い、光ファイバケーブル及びセンシングファイバは直径125 μm 、コア径4 μm のシングルモードファイバから成り立っていて、被覆にUVコートが施されている。受光器にはSiピンフォトダイオードを使用している。これら全ての装置は卓上形除振台の上に設置されている。

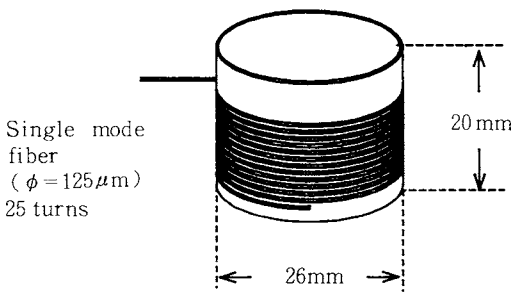


Fig.7 Size of each sensing cup. A 2-meter sensing fiber is wound around a cup with 25 turns. The fiber have a 4 μm -diameter core and a 125 μm -diameter cladding covered with U. V. coating.

4.1 与熱レスポンス及び感度

温度一定の外部容器の中に試料が入った容器と基準物質が入った容器があり、試料が時間率 ΔH の割合で熱を発生しているとする。試料とその容器、基準物質とその容器の熱容量をそれぞれ C_s 、 C_r 、温度をそれぞれ T_s 、 T_r 、装置の冷却係数を F とする。また、 $C = C_s = C_r$ とし、 ΔH を一定とすれば、試料用容器と物質用容器との間の温度差 $\delta = T_s - T_r$ は、次式のように与えられる^{16,17)}。

$$\delta T = \frac{\Delta H}{F} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \right\} \quad (18)$$

ただし、 τ_0 は時定数で次式のように表される。

$$\tau_0 = C / F \quad (19)$$

与熱が終われば、その後の温度差は次式のカーブに従って減少する。

$$\delta T = T_M \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right) \quad (20)$$

ここで、与熱が終わった時点の δT の値を T_M とする。実際に、本計測システムの動作を確認するため、試料容器及び基準物質容器にそれぞれ 6 cm^3 の水を入れ、測定開始30秒後、細いタングステン線に電流を流して 7.2 mcal/s の熱を15分間与えた。そのときの出力を Fig.8 に示す。下方は $\Delta m \phi$ カウンタの出力で $4\Delta\phi$ の 2π rad 以内の値を示し、上方の段階状波形は M カウンタの出力で 2π rad 単位の計測数を示す。微小な位相差が測定されていると同時に、 2π rad 以上の場合も M カウンタが正常に動作していることが示されている。

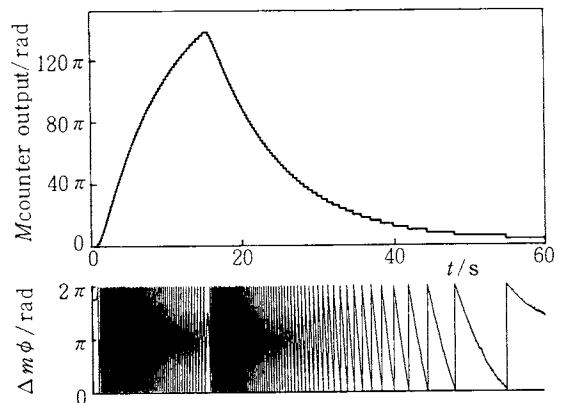


Fig.8 Newly-designed phase difference output (upper trace) and An M-counter output (lower trace) in the system when an electric current was applied continuously for 15 minutes at the rate of 7.2 mcal/s through a fine tungsten wire in the sample cup containing 6 cm^3 of water.

本実験で使用したカップと水の熱容量は 28.0 J/K (カップ及び水の質量をそれぞれ 3.34 および 6.00 g、アルミおよび水の比熱容量をそれぞれ 0.887 J/g \cdot K および 4.18 J/g \cdot K として求めた) と分かっているので、加えた熱から上昇温度を計算した横軸に、そのときの位相差測定値を縦軸にとりグラフに表し、初期状態の傾斜から温度一位相差係数 R は $250 \pi \text{rad/K}$ であることが分かった。

位相差が 1 deg で測定できるとすれば、最小検出温度は $1 / (250 \times 180) = 2.2 \times 10^{-5} \text{ K/deg}$ となる。ただし、実際に示差熱計測を行う場合には、発生熱の形状を考慮して F の値が選ばれるので、この値がそのまま示差熱計測器の感度を表すことにはならない^{16,17)}。

4.2 示差熱測定部の熱対称性

光伝送部とセンシング部の熱対称性の効果を確認するため、実験室の温度を大きく変えることにより、断熱箱内の温度を 20.0°C から 21.2°C まで変化させた。このとき、断熱箱内の温度変化を測定すると同時に、本システムで測定した位相差出力を温度差に換算して比較した。結果を Fig. 9 に示す。この結果から熱対称性の効果により外乱が抑えられていることがよく分かる。

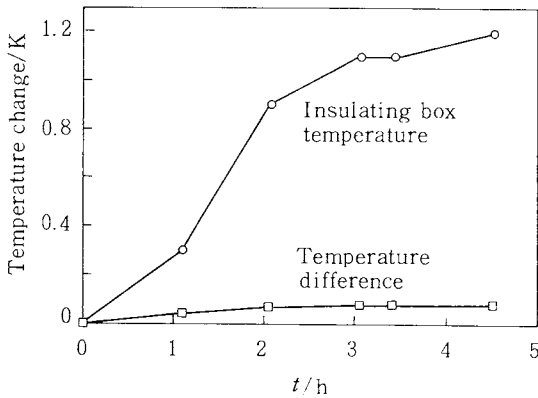


Fig. 9 Effect of symmetrical configuration when the temperature in the insulating box is changed. The upper line indicates a temperature change in the box and the lower line indicates the temperature difference measured by the system.

4.3 パルス与熱実験

試料容器に与えた熱量をパラメータとしてパルス与熱を行った場合の位相差変化の一例を Fig. 10 に示す。ただし、与熱時間率は 58 m cal/s である。それぞれ上から 15, 10, 5 秒間与熱したときの M カウンタの出力のグラフを示す。

今、与えた全熱量を ΔQ とし、ピーク曲線と、時間軸とに囲まれた面積を A とすれば、Speil の関係から装置定数 F が

$$F = \Delta Q / A \quad (21)$$

と求まる^{16),17)}。それぞれの与熱に対する F を求めると、 $F_1 = 9.1 \text{ m cal} \cdot \text{K/s}$ 、 $F_2 = 9.2 \text{ m cal} \cdot \text{K/s}$ 、 $F_3 = 9.7 \text{ m cal} \cdot \text{K/s}$ となり、 $1 \text{ m cal} \cdot \text{K/s}$ 以下の精度で一致した。

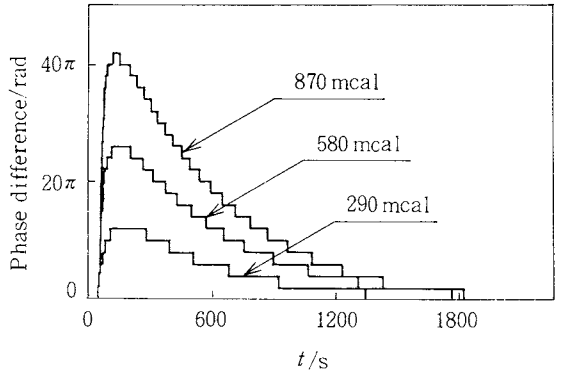


Fig. 10 Examples of M-counter output when a heat pulse is applied. Applied heats are 870 mcal, 580 mcal, 290 mcal, respectively.

5. 検 討

5.1 センシングファイバの膨張及び光損失

センシングファイバの伸びは、光ファイバ芯線自身の膨張のほか、ファイバ被覆 (UV コート) およびアルミ容器の膨張による張力が加わり、これらを分離して考えることは困難であるが、本実験で取り扱ったような微小熱量に対しては、総合的な伸びは直線性が保たれている。また、センシングファイバをコイル状に曲げることによる光損失については、実験により直径が 20 mm 以下になると損失が増し始めることが確かめられた。本実験で用いた直径では損失は問題にならないと考えられる。アルミ容器の直径を小さくしたい場合には光源の波長をより短波長にする必要がある。

5.2 レーザの周波数ゆらぎによる誤差

まず、光源の強度ゆらぎ及び熱外乱による測定誤差を考える。カブラの出力側 2 分岐長をそれぞれ L_1 、 L_2 とすれば、カブラの分岐 H_2 での 2 分岐の戻り光の位相差は次式のように与えられる。ただし光変調は行われていないものとする。

$$\theta = \frac{2\pi n (2L_1 - 2L_2)}{\lambda} = \frac{\omega n L}{c} \quad (22)$$

ただし、 λ はレーザ光の真空中の波長、 ω はレーザの角周波数、 n は光ファイバのコアの屈折率、 c は真空中の光速であり、 $L = 2L_1 - 2L_2$ とする。

従って、光源のゆらぎによる ω の微小変動を $\Delta\omega$ 、外乱による分岐長の微小変化を ΔL とし、これらの微小変化に伴う θ の微小変化を $\Delta\theta$ とすれば、式 (22) は次式のようになる。

$$\begin{aligned} \theta + \Delta\theta &= \frac{n(\omega + \Delta\omega)(L + \Delta L)}{c} \\ &= \frac{n\omega \cdot L}{c} + \frac{n\omega \cdot \Delta L}{c} \\ &\quad + \frac{n\Delta\omega \cdot L}{c} + \frac{n\Delta\omega \cdot \Delta L}{c} \end{aligned} \quad (23)$$

上式の右辺最後の式において、第1項は定数で誤差にはならない。第4項は省略できる。第2項において、 $L = 5 \text{ mm}$ 、光ファイバの線膨張率を $0.4 \times 10^{-6}/\text{K}$ とし、1回の測定中の断熱箱内の温度変化を 0.1 K とすれば、 $\Delta L = 0.2 \text{ mm}$ となるから、第2項による誤差は $2.9 \times 10^{-3} \text{ rad}$ となる。第3項による誤差は、1回測定を行う間(数時間)のレーザ周波数の変動率を 10^{-6} とすると、 $7.2 \times 10^{-2} \text{ rad}$ となる。より高い精度が必要な場合には光源の周波数安定化あるいは断熱箱の改善が必要になる。

5.3 擬似ヘテロダインによる誤差

擬似ヘテロダイン回路の各チャンネルは対称的に構成されているので、処理される両信号は互いに室温の変化による位相変動を相殺することになる。PZT 光変調器の変調指数が 2.82 rad からずれば、直接位相誤差になるので注意が必要である。ただし、この誤差 $4\Delta\phi = 2n\pi$ (n は整数) のときは零となるので⁷⁾、誤差の有無は測定結果から容易に判定でき、本実験で測定した値に対しては、許容範囲内に設定されている。

次に、電子回路の雑音による誤差を考える。本システムでは、位相差は零クロス点で読み取るので、雑音に対する位相ジッタを $\phi_d = [d(K_b \sin \theta) / d\theta]_{\theta=0}$ と考えれば、本実験では $K_b = 5 \text{ V}$ に設定しているの、位相を 1 deg まで読み取るための許容雑音は、 $V_d = (\pi K_b / 180) \times 10^{-1} = 87 \text{ mV}$ となる。本装置ではセンサ用光ファイバの先端はアルミ蒸着されていて、光は 100% に近い反射率で受光端に戻って来て、十分な受光出力が得られるので、実際のフィルタ出力点での測定雑音は -35 dB 以下となり、許容範囲に入る。

次いで、温度変化速度に対するフィルタの誤差を考える。フィルタの中心周波数を f_r 、バンド幅を Δf とすれば、選択度 Q は

$$Q = \frac{f_r}{2\Delta f} \quad (24)$$

と与えられるから、振幅の変動を 3 dB 以下に抑えるためには位相変化速度 V_o は次のような関係がなければならない。

$$V_o = \frac{d(4\Delta\phi)}{dt} \leq \frac{\pi f_r}{Q} \quad (25)$$

本システムでは $Q = 20$ のフィルタを用いているから、温度変化速度 V_T は

$$V_T = V_o / R \leq 4.0 \text{ K/s} \quad (26)$$

となる。ただし、 R は 4.1 で求めた温度係数で $250 \pi \text{ rad/K}$ である。この速度を越えて温度変化が起こる場合には、改めて誤差の検討が必要となる。

6. おわりに

光ファイバカプラの分岐の先端部をセンサとしたマイケルソン干渉計を示差熱計測に適用することを検討した。光検波には外部変調形擬似ヘテロダイン方式を用いて、安定に温度差に比例した位相差が抽出でき、位相差測定にはこれに適した回路を設計・試作した。センサ部の感度として $2.2 \times 10^{-5} \text{ K/deg}$ の値を得た。干渉計として光ファイバカプラを用いたので伝送路を短くできたうえ熱対称的な構成がとれ、差動効果を高めることができた。その結果、mcal オーダの熱量の測定が再現できた。光ファイバカプラ分岐の長さの差を最小にし、熱対称性をより向上するための技術が確立されれば、本方式が実用的な微小示差熱計測に適用可能であることを確認した。

7. 謝辞

示差熱測定部について検討して頂いた真空理工株式会社の前園明一氏及び加藤良三氏、周波数安定化レーザを提供して頂いた本学梅田倫弘助教授、実験を分担してもらった元本学大学院生小林憲昭、高橋成文尚君に感謝する。本研究は財団法人村田学術振興財団の助成のもとに行われたことを記し、謝意を表す。

文献

- 1) 武藤勝俊, 電子情報通信学会誌 **69**, 1, pp.59-60 (1986).
- 2) 大越孝敬, "光ファイバセンサ", オーム社 (1986).
- 3) 林, 新井, 井田, 神野, 電子通信学会論文誌(c) **170-C**, 7, pp.1083-1091 (1985).
- 4) F. Farahi, T. P. Newson, J. D. C. Jones and D. A. Jackson, *Optical Communication* **65**, 5, pp.319-321 (1988).
- 5) 鍾, 保立, 電子情報通信学会技術研究報告 **OQE 88**, 100, 1-8 (1988).
- 6) 関, 木村, 野田, 昭61電子情報通信学会光・電波部門全大会講演論文集, 386 (1986).
- 7) Y. Seki and K. Noda, *Technical Digest OFS'86* 9-2, pp.227-230 (1986).
- 8) Y. Seki and K. Noda, *IEEE J. Lightwave technol* **LT-5**, 7, pp.961-966 (1987).
- 9) A. D. Kersey, A. C. Lewin, and D. A. Jackson, *Electronics Letter* **20**, 9, pp.368-370 (1984).

- 10) 凌, 木村, 高橋, 秋元, 小林, 野田, 光ファイバセンサワークショップ講演論文集, **WOFS 5**, 26, pp.191-197 (1987).
- 11) T. Kimura, S. Takahashi, N. Kobayashi, O. Akimoto and K. Noda, *Technical Digest OFS'88* ThCC3, pp.179-182 (1988).
- 12) T. Kimura, S. Takahashi, N. Kobayashi, O. Akimoto and K. Noda, *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement* 38, No2, pp.599-603 (1989).
- 13) 木村, 高橋, 小林, 秋元, 野田, 電子情報通信学会論文誌(c) **172-C-1**, No.9, pp.503-520 (1989).
- 14) 例えば, 久保田広, "応用光学", 岩波書店(1962), pp.74-76.
- 15) H. Miyagi, H. Hoshino, T. Kimura, K. Noda, 電子情報通信学会信学論文誌(E) **170-E**, 7, pp.1083-1091 (1986).
- 16) 例えば, W. WM. Wendlant 著, 笛木, 柳田, 高橋訳, "熱的分析法", 産業図書, (1968) pp.112-222.
- 17) 例えば, 日本化学学会編, "新実験化学講座2", 丸善株式会社(1984), pp.87-90.