

光ファイバ型赤外線輻射温度計による加工温度の測定：温度計の特性

著者	上田 隆司, 金田 泰幸, 佐藤 昌彦, 杉田 忠彰
雑誌名	日本機械学会論文集 C編 = Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers Series C
巻	58
号	545
ページ	302-309
発行年	1992-01-25
URL	http://hdl.handle.net/2297/36973

doi: 10.1299/kikaic.58.302

光ファイバ型赤外線輻射温度計による加工温度の測定*

(温度計の特性)

上田 隆 司*¹ 金田 泰 幸*²
佐藤 昌 彦*³ 杉田 忠 彰*¹

Measurement of Machining Temperature Using Infrared Radiation Pyrometer With Optical Fiber (Characteristics of Pyrometer)

Takashi UEDA, Yasuyuki KANADA,
Masahiko SATOU and Tadaaki SUGITA

The fundamental characteristics of a new type of infrared radiation pyrometer using an optical fiber are investigated theoretically and experimentally. The structure of this pyrometer is that the optical fiber accepts the infrared flux radiated from the object and transmits it to an infrared detector InSb cell. This I. R. P. is suitable for measuring the temperature of a very small object whose temperature changes rapidly. The flexibility of the optical fiber also makes it possible to measure the inner temperature of the object by drilling a microscopically fine hole in it and inserting the fiber. Three types of optical fiber were employed: quartz fiber, fluoride fiber and chalcogenide fiber. The main results obtained are as follows. The setting location of the fiber is independent of the total energy accepted by the fiber, even if the object of a flat surface is not placed vertically to the axis of the fiber. This result is also applied to the object of a curved surface. The target area of the graded-index fiber is smaller than that of the step-index fiber when they are placed at a same distance from the object. The I. R. P. with the chalcogenide fiber can be useful for temperatures above 50°C.

Key Words: Manufacturing Technology, Grinding Temperature Measurement, Cutting Temperature Measurement, Infrared Radiation Pyrometer, Optical Fiber, Quartz Fiber, Fluoride Fiber, Chalcogenide Fiber

1. 緒 言

加工温度の測定において、熱電対は取扱いが比較的簡単であること、熱電対に代わる適当な方法がないことなどから、一般的な測定方法として取扱われている。しかし、熱電対は高温接点の大きさに応答速度が変化すること、高温で変質しやすいこと、動いている物体の温度測定が困難であることなどの欠点がある。また、これらの欠点を補うため、非接触で測定できる赤外線輻射温度計を用いる場合もあるが定量的な測定がむずかしく、定性的な結果に終わる場合が多い。

最近、著者らは光ファイバと高速光電変換素子を組合せた新しいタイプの赤外線輻射温度計を製作し、種々の加工温度の測定に適用してきた。この温度計は、コア径の小さい光ファイバを用いることにより、直径数十 μm の微小領域で高速で変化する温度を非接触で測定することができ、従来のように光学顕微鏡に相当する拡大装置を必要としない。また、光ファイバを用いていることから複雑に入り組んでいる箇所も容易に測定でき、測定対象物に光ファイバが入る程度

の小さな穴をあければ、内部の温度も測定可能であるなど多くの特長を持っている。この温度計の開発により、熱電対では測定不可能なファインセラミックスの研削表面近傍の温度分布、アルミナ砥粒やダイヤモンド砥粒の切れ刃温度、レーザ加工中の加工物表面の温度などの測定が可能となり、これまで得られなかった多くの知見を得ている⁽¹⁾⁻⁽⁹⁾。しかし、これまでの測定では、この温度測定法の特長の一部を活用しているに過ぎず⁽¹⁰⁾、まだ残されている特性も多い。

そこで、本研究では、この温度測定法の確立を目的として、温度計のもつ基本特性について解析・実験の両面から詳細に検討を加えた。

使 用 記 号

- a : だ円の短軸 μm
- b : だ円の長軸 μm
- d : コア径 μm
- d_i : 感温面の直径 μm
- d_{e_i} : df から dF' に放射されるエネルギー W
- E : 受光エネルギー W
- df : 感温面内の微小面積 μm^2
- df' : df のファイバ端面に平行な面への投影面
- df_1 : df' の円すい底面への投影面

* 原稿受付 平成3年6月17日。

¹ 正員、金沢大学工学部(〒920 金沢市小立野2-40-20)。

² 住友電工(株)(〒664 伊丹市昆陽北1-1-1)。

³ 学生員、金沢大学大学院。

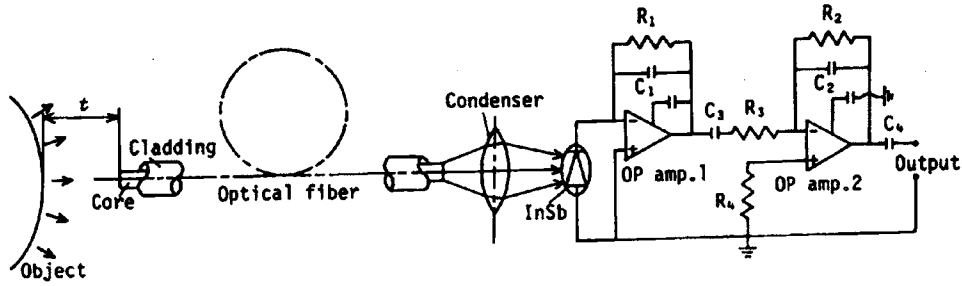


図 1 温度測定の基本構造

- dF' : コア内の微小面積 μm^2
- g : 光ファイバの集束定数 $=2\sqrt{2\Delta}/d$ $1/\mu\text{m}$
- h : 円すいの頂点から底面までの距離 μm
- $J_{\lambda n}$: 法線方向スペクトル強度 $\text{W}/(\text{m}^2\mu\text{m})$
- l : コアの中心軸からの距離 μm
- l_s : コアの中心軸から感温面の最も遠い点までの距離 μm
- $l_{s\text{max}}$: l_s の最大値 μm
- n_1 : コアの屈折率
- n_2 : クラッドの屈折率
- R : df と dF' の距離 μm
- R_1 : df_1 と dF' の距離 μm
- S : 感温面積 μm^2
- t : 測定距離 μm
- t_h : 光ファイバの軸ずれ μm
- β_0 : 比例定数
- Δ : 比屈折率差 %
- θ : 測定対象面の傾斜角 deg
- λ : 波長 μm
- $\lambda_1 \sim \lambda_2$: 温度計の測定可能な波長範囲 μm
- Λ : 相対感度
- $2\xi_{\text{max}}$: 受光角 deg
- ϕ : 角度 deg
- ω : 変数 $0 \leq \omega \leq 2\pi$
- $d\Omega$: 立体角 sr

2. 基本特性

図 1 に示すように、測定対象物から輻射された赤外線は 1 本の光ファイバで受光して伝送し、集光レンズを介して光電変換素子に集光して電気信号に変換する構造をしている。したがって、光ファイバの受光面と測定対象物との間の距離（測定距離）は温度計で測定する面積の大きさ（感温面積）、および温度計の感度を決定する受光エネルギーに大きな影響を及ぼすと考えられる。そこで、ステップ型、およびグレーデッド型の 2 種類の光ファイバについて、測定距離が感温面積や受

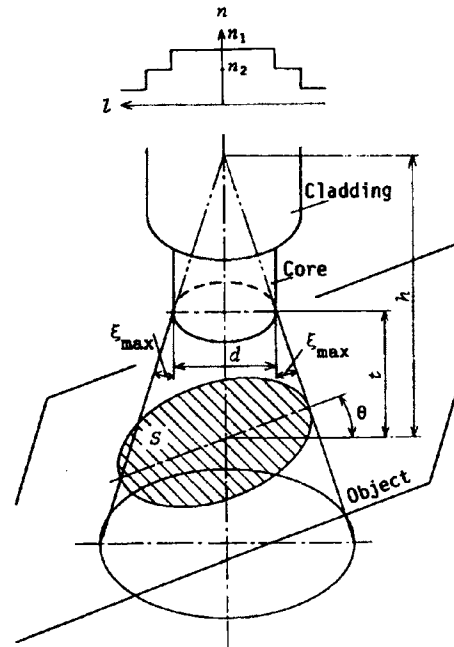


図 2 傾斜面での感温面積の大きさ (ステップ型光ファイバ)

光エネルギーに及ぼす影響について解析的に検討してみた。

2.1 感温面積 微小領域の温度を計測しようとするとき、感温面積を正確に特定できることは温度計の極めて重要な性能となる。

2.1.1 ステップ型光ファイバ 図 2 は測定対象面が光軸に対して傾斜した平面の場合を表している。ステップ型光ファイバはコアとクラッドの屈折率の違いによって起こる全反射を利用して赤外線を伝送していることから、 ξ_{max} よりも大きな角度でコアに入射した赤外線はクラッド側に透過してしまい、受光角 $2\xi_{\text{max}}$ 内に入射した赤外線しか伝送されない。したがって、感温面積 S はハッチングで表す領域となる。円すいの斜断面が円となることから、 θ を円すい底面に対する斜断面の傾斜角、 $2\xi_{\text{max}}$ を受光角（円すいの頂

角), h を円すい頂点から斜断面までの距離, t を測定距離とすると, だ円の短軸 a , 長軸 b は

$$a = \frac{2h \tan \xi_{\max}}{\sqrt{1 - \tan^2 \theta \tan^2 \xi_{\max}}} \dots\dots\dots (1)$$

$$b = \frac{2h \tan \xi_{\max}}{\cos \theta (1 - \tan^2 \theta \tan^2 \xi_{\max})} \dots\dots\dots (2)$$

ただし, $h \tan \xi_{\max} = t \tan \xi_{\max} + \frac{d}{2}$

となることから, 感温面積 S は次式で与えられる.

$$S = \frac{\pi (t \tan \xi_{\max} + d/2)^2}{\cos \theta (1 - \tan^2 \theta \tan^2 \xi_{\max})^{3/2}} \dots\dots\dots (3)$$

$\theta = 0$ のとき, すなわち測定対象面がコアの中心軸に垂直となる場合は

$$S = \pi (t \tan \xi_{\max} + d/2)^2 \dots\dots\dots (4)$$

となる⁽¹⁾.

2.1.2 グレーデッド型光ファイバ 図3に示すように, グレーデッド型光ファイバは屈折率がコア内で二乗分布をしているため, 赤外線は徐々に曲げられながら伝送されていき, その軌跡はサインカーブとなる. このため, 受光面における受光角 $2\xi_{\max}$ は, ファイバの中心で最大となり, 中心軸から遠ざかるにつれて徐々に減少し, コアとクラッドの境界点では 0° となり, 中心軸と平行な赤外線しか入射しないことになる.

ここでファイバの中心から l の距離にある点 O_i での受光角 $2\xi_{\max}(\omega)$ を表すため, $l = (d \cdot \sin \omega) / 2$ とする変数 $\omega (0 \leq \omega \leq 2\pi)$ を導入すると, 次式の関係が成り立つ.

$$\tan \{\xi_{\max}(\omega)\} = \frac{n_1 g d}{2} \cos \omega \dots\dots\dots (5)$$

ただし, n_1 はコアの屈折率, g はファイバの集束定数, d はコア径である. すると, 点 O_i に対する感温面の半径が

$$l \tan \{\xi_{\max}(\omega)\}$$

となることから, 図のようにコアの中心軸からこの感温面の最も遠い点までの距離 l_s は,

$$l_s = \frac{d}{2} (\sin \omega + n_1 t g \cos \omega) \dots\dots\dots (6)$$

となる. l_s の最大値が, 測定距離 t における感温面積 S の半径となるので, この最大値 $l_{s \max}$ を求めると

$$l_{s \max} = \frac{d}{2} \sqrt{1 + n_1^2 t^2 g^2} \dots\dots\dots (7)$$

となり, 感温面積 S は

$$S = \frac{\pi d^2}{4} (1 + n_1^2 t^2 g^2) \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる.

一方, 角度 θ 傾斜した測定対象面(図2参照)における感温面の輪郭曲線は, 図3の斜線の面を座標変換す

ることにより求めることができ,

$$\frac{x^2}{\frac{at^2 + \beta - a\beta \tan^2 \theta}{1 - a \tan^2 \theta}} + \frac{\left\{ y + \frac{ta \sin \theta}{\cos^2 \theta (1 - a \tan^2 \theta)} \right\}^2}{\frac{at^2 + \beta - a\beta \tan^2 \theta}{\cos^2 \theta (1 - a \tan^2 \theta)^2}} = 1 \dots\dots\dots (9)$$

ただし, $\alpha = \frac{d^2 g^2 n_1^2}{4}$, $\beta = \frac{d^2}{4}$

式(9)より, 感温面の形状がだ円であることがわかる. したがって, 傾斜面上における感温面積 S は,

$$S = \pi \frac{at^2 + \beta - a\beta \tan^2 \theta}{\cos \theta (1 - a \tan^2 \theta)^{3/2}} \dots\dots\dots (10)$$

となる. なお, $\theta = 0$ のとき, 式(10)は式(8)と等しくなる.

2.1.3 測定距離の影響 測定対象面に対して光ファイバを垂直に設置する場合が多い. このとき, いずれの型の光ファイバを用いても感温面は円になる. そこで, 式(4), (8)を用いて, 直径 d_i への測定距離 t の影響を比較してみた. 計算結果を図4に実線で示す. 光ファイバとしてはいずれもコア径 $50\mu\text{m}$ の標準的なタイプの光ファイバを用いている. 図より明らかなように, グレーデッド型のファイバでは t が大きくなるに伴う d_i の増大の程度が低く抑えられている. すなわち, 光ファイバを測定対象物から離しても感温面積を小さく保つことが可能であり, ステップ型ファイバよりも優れていることになる.

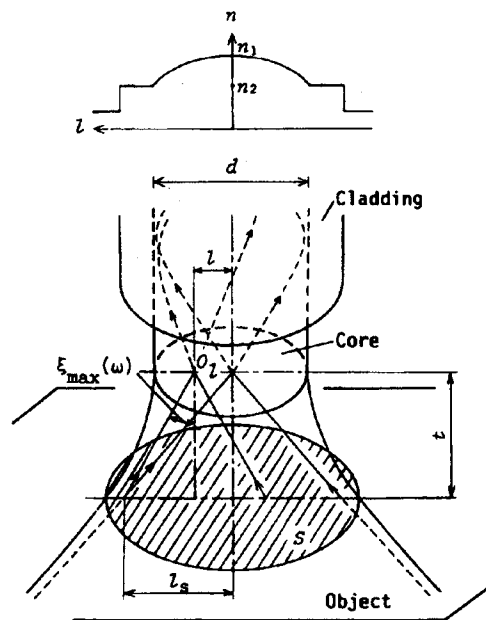


図3 垂直面での感温面積の大きさ (グレーデッド型光ファイバ)

2.2 受光エネルギー 温度計の出力信号の大きさは光電変換素子に入射する赤外線エネルギーの量で決まる。そこで、温度が一樣な測定対象面から光ファイバが受光するエネルギー量を解析的に調べることにする。

2.2.1 測定対象面が大きい場合 測定対象面が大きく、温度計の感温面がこの面内となる状態で、一般の測定でもっともよく生じる場合である。

(1) ステップ型光ファイバ 図5は光ファイバの中心軸が測定対象面に対して傾斜している場合を表している。すると、感温面積 S 内の微小面積 df から立体角 $d\Omega$ で表されるコアの微小面積 dF' に、単位時間に輻射される波長範囲 $(\lambda - d\lambda/2) \sim (\lambda + d\lambda/2)$ のエネルギー量 de_λ は

$$de_\lambda = J_{\lambda n} d\lambda \cos \phi \cos \theta df d\Omega \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 $J_{\lambda n}$ は測定対象面の法線方向スペクトル強度であり、図6では

$$d\Omega = dF' \cos \phi / R^2 \dots\dots\dots (12)$$

と表すことができる。

一方、図5の詳細図に示すように、感温面積 S 内の微小面積を df 、この df のファイバ端面に平行な面への投影面を df' 、さらにこの df' の円すい底面への投影面を df_1 とすると、

$$df = \frac{R^2}{R_1^2 \cos \theta} df_1 \dots\dots\dots (13)$$

式(12)、(13)を式(11)に代入すると、

$$de_\lambda = J_{\lambda n} d\lambda \frac{\cos^2 \phi}{R_1^2} dF' df_1 \dots\dots\dots (14)$$

式(14)を df_1 、 dF' で積分することにより、コア全体が受け取るエネルギー E_λ を求めることができ、

$$E_\lambda = \frac{\pi^2 d^2}{8} J_{\lambda n} d\lambda (1 - \cos 2\xi_{\max}) \dots\dots\dots (15)$$

式(15)には、 R_1 すなわち測定距離 l 、および傾斜角 θ が含まれておらず、ファイバが受光する輻射エネルギーはファイバの設定位置および設定角度に依存しないことがわかる。

したがって、感温面が測定対象面内にあれば、ファイバの設定位置、設定角度は温度計の出力信号の大きさに影響しないことになる。

一方、測定対象面が球面のように曲率を持った面になると、式(11)、(13)中の傾斜角 θ が微小面積 df の位置に依存して変化することになる。ところが、式(11)に式(13)を代入して得られる式(14)では θ が消去されてしまうことから、結局コアの受け得る全エネルギー E_λ は式(15)で表されることになる。

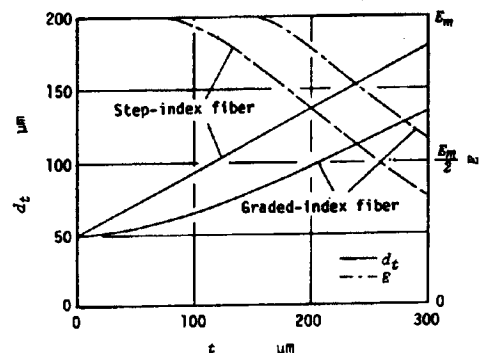
したがって、曲率を持った測定面に対しても、フ

イバの設定位置、設定角度は温度計の出力信号に影響しないという、温度計の使用上きわめて重要な結論が得られる。

(2) グレーデッド型光ファイバ コアの中心軸に対して垂直な平面、傾斜した平面、および曲率をもった面に対しても、コアが受け取る全エネルギー E_λ はステップ型の場合と全く同様に考えることができ、

$$E_\lambda = \frac{\pi^2 d^2}{4} J_{\lambda n} d\lambda \left(1 + \frac{4}{n_1^2 g^2 d^2} \ln \frac{4}{4 + n_1^2 g^2 d^2} \right) \dots\dots\dots (16)$$

と表される。式(16)に測定距離 l や傾斜角 θ が含まれておらず、グレーデッド型光ファイバにおいても受光エネルギーはその設定位置に依存しないことがわかる。



Step-index fiber : $d=50 \mu\text{m}$, $\Delta=1.0\%$, $n_1=1.5$
Graded-index fiber : $d=50 \mu\text{m}$, $\Delta=1.0\%$, $n_1=1.475$

図4 測定距離の感温面直径・受光エネルギーへの影響

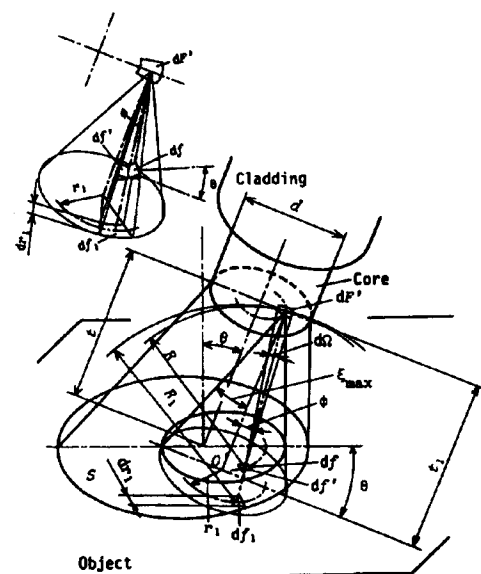


図5 傾斜面での受光エネルギー (ステップ型光ファイバ)

2.2.2 測定対象面が小さい場合 測定対象面が小さいとき、測定距離 l を大きくすると温度計の感温面がこの面より大きくなる状態が生じ、受光エネルギーに影響してくる。そこで、一例として砥粒切れ刃の温度を測定する場合を取り上げ⁽⁹⁾、直径 $80\ \mu\text{m}$ の円形測定対象面に垂直に、かつファイバ軸が円の中心と一致するように設置された状態を考える。このときの受光エネルギー E を計算した結果を図4に一点鎖線で示す。コア径が同じ $50\ \mu\text{m}$ のステップ型とグレーデッド型の光ファイバを比較しているが、ステップ型では $l=70\ \mu\text{m}$ で E が減少し始めるのに対し、グレーデッド型では $l=150\ \mu\text{m}$ まで E の減少は起こらず、また減少のこう配も小さい。したがって、この結果からもグレーデッド型光ファイバが有利であるといえる。

3. 温度計の構成要素と測定性能

図1に示したように、この温度計は測定対象物から放射された赤外線を受光ファイバで受光して伝送し、光電変換素子で電気信号に変換する構造から、温度計の性能は光ファイバと光電変換素子の組合せで定まる。

3.1 光電変換素子と応答速度 表1に示すように、光電変換素子で応答速度および測定波長範囲が異なる。応答速度は Ge, InAs, InSb, HgCdTe が $1\ \mu\text{s}$ と高速であり、PbS が $100\sim 400\ \mu\text{s}$ と遅くなる。一方、Ge は波長 $\lambda=1.9\ \mu\text{m}$ までの赤外線しか検出できないのに対し、InSb は $\lambda=5.5\ \mu\text{m}$ まで、HgCdTe では $\lambda=14\ \mu\text{m}$ までの赤外線を検出することができる⁽¹¹⁾。

一例として InSb セルを用いたときの温度計の回路図を図1に示す。赤外線の入射によって生じた電流を

1段めの OP アンプで電圧に変換し、2段めの OP アンプで増幅している。図6はこの増幅回路の周波数特性であるが、ほぼ $100\ \text{kHz}$ までフラットな特性をもち、InSb セルの応答速度が $1\ \mu\text{s}$ と十分高速であることから、この温度計の周波数特性は図6で表されることになる。

3.2 光ファイバ 使用した光ファイバの特性値を表2に示す。石英光ファイバは光通信で一般に使われているもので、コア-クラッド構造をしており、コアの屈折率が一定のステップ型、および屈折率が変化するグレーデッド型を用いた。コア径は約 $20\ \mu\text{m}$, $50\ \mu\text{m}$ である。フッ化物光ファイバ⁽¹²⁾ はコア、クラッドが ZrF_4 , BaF_2 , LiF , NaF を主成分とするフッ化物ガラスでできており、石英光ファイバと同様コア-クラッド構造をしたステップ型光ファイバである。コア径が $50\ \mu\text{m}$ 、比屈折率差が 0.97 と石英光ファイバとほぼ同様の特性を持っている。カルコゲナイド光ファイバ⁽¹³⁾ は周期律表 6B 族元素 S, Se, Te を主成分とするカルコゲナイドガラスをコア材としたファイバである。先のファイバと異なり、コアをコーティングしているテフロンがクラッドの役を果たしている。コア径は、カルコゲナイドガラスの強度が小さいことから 320

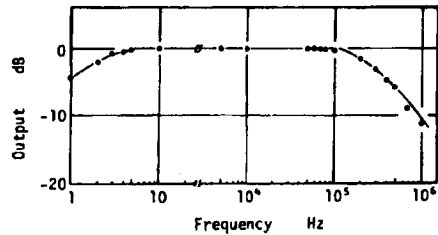


図6 増幅回路(図1)の周波数特性

表1 光電変換素子の特性値

Infrared detector	Ge	PbS	InAs	InSb	HgCdTe
Spectral response, μm	0.5~1.9	0.5~2.9	0.5~3.0	0.5~5.5	6.5~14
Peak wavelength, μm	1.9	2.2	3.0	5.3	12
Specific detectivity D^* , $\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$	1×10^{11}	1×10^{11}	6×10^{11}	1×10^{11}	2×10^{10}
Response time, μs	1	100~400	1	1	1
Operating temperature, K	R.T.	R.T.	77	77	77

表2 光ファイバの特性値

Material of core	Quartz			Fluoride glass*	Chalcogenide glass**
	Step	Step	Graded	Step	Step
Type of fiber	Step	Step	Graded	Step	Step
Core diameter, μm	20.1	53.3	49.0	50	320
Refractive index of core	1.5	1.5	1.475	1.5095	2.41 ($\lambda=5\ \mu\text{m}$)
Refractive index difference, Δn	1.2	1.0	1.0	0.97	-----
Numerical aperture, NA	0.232	0.212	-----	0.210	-----
Acceptance angle, $2\theta_{NA}$, deg	26.9	24.5	-----	24.2	-----

* Fluoride glass (Core: ZrF_4 , BaF_2 , LiF , Cladding: ZrF_4 , BaF_2 , NaF)
 ** Chalcogenide glass (Core: As_2S_3 , Cladding: PTFE)

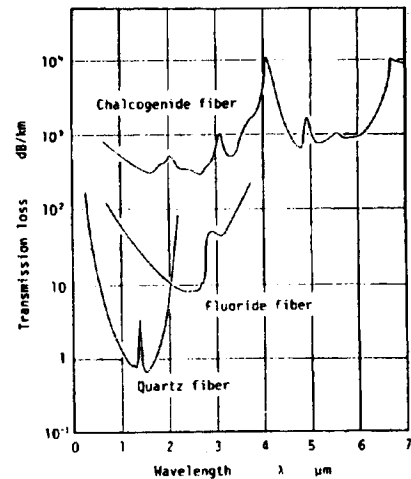


図7 光ファイバの伝送損失

μm と大きく、感温面積が他の光ファイバより大きくなってしまふ。

図7に伝送損失を示す。石英光ファイバが $\lambda=2\mu\text{m}$ から損失が大きくなるのに対し、フッ化物光ファイバでは $3.5\mu\text{m}$ 程度の赤外線まで伝送できる。カルコゲナイド光ファイバはフッ化物光ファイバに比べて全体的に損失がほぼ1桁程度大きくなるが、 $6\mu\text{m}$ 以上の赤外線まで伝送できる。

3.3 相対感度 この温度計を用いて温度 T の黒体から輻射される赤外線エネルギーを測定したときに得られる出力、すなわち相対感度 A は、黒体の輻射能を $J_\lambda(\lambda, T)$ 、光ファイバの分光透過率を $F(\lambda)$ 、集光レンズの分光透過率を $G(\lambda)$ 、光電変換素子の分光感度特性を $D(\lambda)$ とすると、次式で与えられる。

$$A = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \beta_0 J_\lambda(\lambda, T) F(\lambda) G(\lambda) D(\lambda) d\lambda \dots\dots (17)$$

ただし、 β_0 は比例定数、 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ は測定可能な波長範囲である。

光電変換素子と光ファイバの組合せで種々の温度計ができるが、ここではその代表例として光電変換素子に InSb を用いた場合を取り上げることにする。光ファイバに石英、およびフッ化物光ファイバを用いた場合、波長 $0.5\mu\text{m}$ 以下では輻射されるエネルギーが十

分小さく無視できるので、 $\lambda_1=0.5\mu\text{m}$ とおき、 λ_2 をパラメータとして式(17)を計算し、相対感度を求めた。カルコゲナイド光ファイバを用いた温度計では、InSbセルの長波長側のカットオフ値が $5.5\mu\text{m}$ であることから、 $\lambda_2=5.5\mu\text{m}$ とおき、 λ_1 をパラメータとして式(17)を計算した。計算結果を図8, 9, 10に示す。

相対感度を比較すると、石英光ファイバ-InSb温度計の 500°C における感度が他の光ファイバを用いることで 100°C 以下で得られており、これらの新しい光ファイバにより測定下限温度を改善できることが期待できる。

4. 実験による検討

4.1 感温面積 測定対象面が光ファイバ中心軸に垂直な場合の感温面積は式(4)および式(8)で与えられる。ところが、これらの式は測定対象面が理想的な拡散面であり、かつ受光角内で入射した赤外線が均一に伝送されるとして導かれている。そこで、図11に示す装置を用いて、これらの式の妥当性を確認する実験を行った。レーザ光源(NEC-GLG 5350, 波長 $0.6328\mu\text{m}$)から照射された光を光ファイバ-1の一端で受光

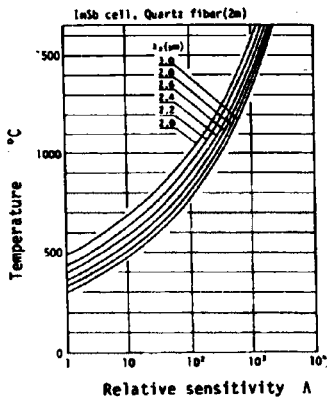


図8 石英光ファイバを用いた温度計の相対感度

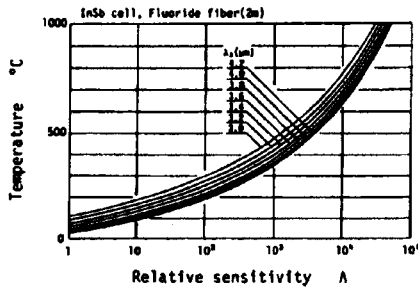


図9 フッ化物光ファイバを用いた温度計の相対感度

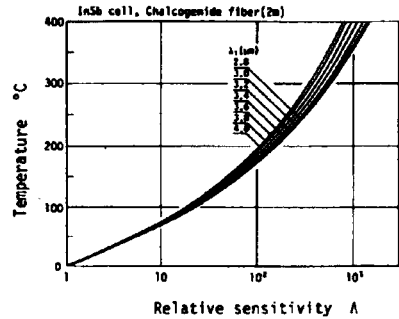


図10 カルコゲナイド光ファイバを用いた温度計の相対感度

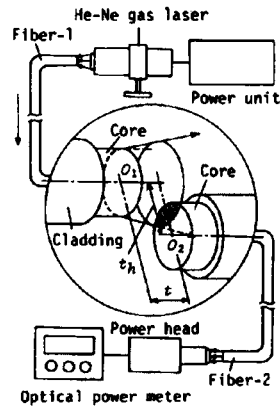


図11 光ファイバ間の軸ずれによる伝送損失の測定装置

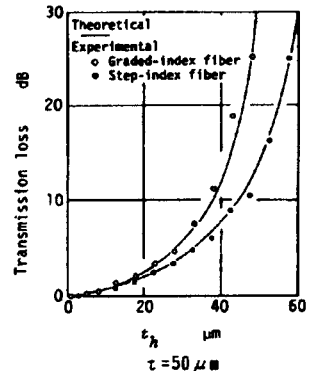
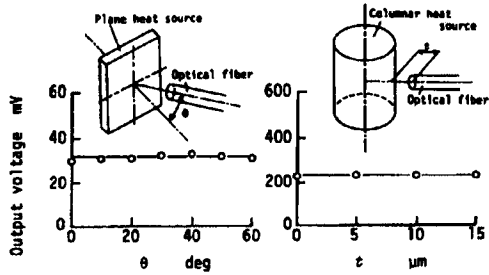


図12 光ファイバ間の軸ずれが伝送損失に及ぼす影響



(a) 傾斜角の影響 (b) 測定距離の影響

図 13 光ファイバの設定位置が受光エネルギーに及ぼす影響

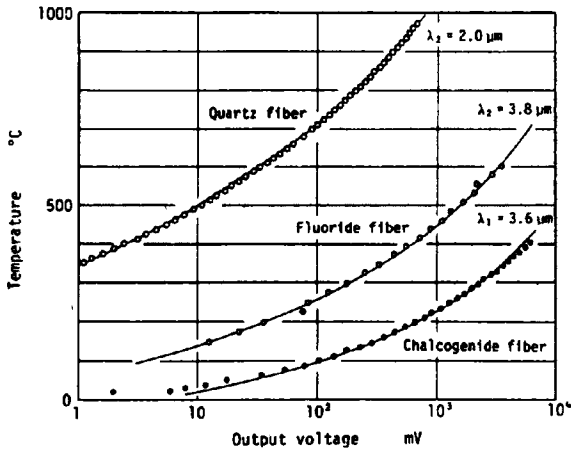


図 14 光ファイバの種類による測定温度範囲の比較

する。光ファイバ-1にはステップ型多モードファイバを用いていることから、他端のコア面全体から均一にレーザー光が射出される。そこで、この面を測定対象面とし、距離 t のところに測定用の光ファイバ-2を設置する。この状態で両ファイバの中心軸のずれ h を変化させ、このときのファイバ-2の伝送エネルギーを光パワーメータ(安藤電気, AQ-1111)で測定すれば、測定対象面と感温面の位置関係によって変化する受光エネルギーを求めることができる。光ファイバ-2に表2に示すコア径 $50 \mu\text{m}$ のステップ型およびグレーデッド型石英光ファイバを用いた結果が図12である。

図中の実線は式(4)、(8)で表されるファイバ-2の感温面内のエネルギーが伝送されるとして計算した結果である。ファイバ間の距離、すなわち測定距離 t を0、50、100 μm と変化させているが、いずれの結果も測定値と計算値はよく一致しており、式(4)、(8)で感温面積が与えられることが確認できる。また、両ファイバを比較すると、グレーデッド型で軸ずれによる損失が大きくなっている。図4で考察したように、グレーデッド型の感温面積がステップ型よりも小さくなるためである。

4.2 受光エネルギー 電気的に一定温度に加熱されている測定対象物の温度を測定したときの出力電圧が図13(a)である。測定距離 $t=5 \text{ mm}$ のもとで、傾斜角 θ を変化させているが、 θ の値にかかわらず、一定の出力が得られていることがわかる。

図13(b)では円柱状の測定対象面の温度を測定距離 t を変化させて測定しているが、このときも温度計の出力電圧は一定となっている。したがって、温度計の感温面が測定対象面内にあれば光ファイバが受光するエネルギーは、測定距離 t や傾斜角 θ には依存せず、曲面の場合も平面と同様に測定できるという2・2節の結論が確かめられたことになる。

4.3 温度校正 代表例として、InSbセルと図7に示す3種類の光ファイバを組合せた温度計の校正曲線を図14に示す。図中の実線は実験結果に図8、9、10に示す相対感度曲線の内、それぞれ図に記す λ の値の曲線を当てはめたものであり、いずれも測定値とよく一致している。石英光ファイバでは 400°C 以上の温度しか測定できないのに対し、フッ化物光ファイバで 150°C 、カルコゲナイド光ファイバでほぼ 50°C 以上の温度を精度よく測定することができることがわかる。

5. 結 言

光ファイバと光電変換素子を組合せた新しいタイプの赤外線放射温度計のもつ特性について、理論的に検討するとともに実験によって得られた結果の妥当性を確かめてみた。その結果、光ファイバの中心軸に垂直に置かれた平面だけでなく、傾斜した面や、曲面の温度に対しても温度計の感度は測定距離で変化しないこと、測定距離から感温面積を特定できること、グレーデッド型光ファイバのほうが測定距離の影響を受けにくいこと、光ファイバの特性を活かした選び方をすることにより 50°C 以上の温度を精度良く測定することができること、などがわかった。

おわりに、光ファイバの提供を受けた藤倉電線(株)、NTT(株)、非酸化物ガラス研究開発(株)に深謝する。

文 献

- (1) 上田・ほか2名, 精密機械, 48-5(1982), 629.
- (2) Ueda, T., ほか2名, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, 107-5(1985), 127.
- (3) 上田・ほか2名, 精密機械, 50-12(1984), 1896.
- (4) 上田・ほか2名, 精密機械, 51-9(1985), 1732.
- (5) Ueda, T., ほか2名, *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, 108-11(1986), 247.
- (6) 上田・ほか2名, 機論, 55-516, C(1989), 2251.
- (7) 上田・ほか4名, 精密工学会誌, 55-12(1989), 2273.
- (8) 上田・ほか3名, 精密工学会誌, 56-8(1990), 1452.
- (9) 上田・ほか3名, 精密工学会誌, 56-9(1990), 1683.

- (10) 上田・ほか1名, 材料, 36-403(1984), 404.
(11) 例えば, 浜松ホトニクス(株), 赤外線検出カタログ.

- (12) Sakaguti, S., ほか1名, *IEEE*, LT-5-9(1987), 1221.
(13) 山岸, *New Glass*, 3-4(1989), 10.
-