

光ファイバー温度計の計測精度に関する研究

(第1報, 火炎温度計測センサーの特性)

石田 正 弘* ・ 駱 貴 峰*
植 木 弘 信* ・ 黒 川 清 司*Studies on Measurement Accuracy of
the Optical Fiber Thermometer
(1st Report ; Characteristics of Sapphire Rod Sensor
for Flame Temperature Measurement)

by

Masahiro ISHIDA*, Gui-Feng LUO*,
Hironobu UEKI* and Kiyoshi KUROKAWA*

In order to measure accurately the flame temperature by means of the optical fiber thermometer, the fundamental sensor characteristics were made clear in the following points by using two kinds of calibration apparatus with the blackbody furnace and the semiconductor laser light source. The view angles of the flat-edge type sensor and the beveled-edge type sensor were very narrow within $\pm 10^\circ$ in pitch angle while the yaw angle characteristic of the beveled one was within $\pm 15^\circ$. The decrement of radiation intensity due to the sapphire rod sensor and the optical fiber cable, which dominates the measurement accuracy of the flame temperature, was also calibrated quantitatively by using the blackbody furnace, and it was so large as 58% in the present beveled-edge sensor.

1. ま え が き

高温の燃焼ガス温度を応答よく、かつ精度よく計りたいという要望が、近年、各方面でますます高まっている。特にディーゼル機関やガスタービンなどの内燃機関において、燃焼室内のガス温度分布の瞬時測定法の発展が切望されている。Dils¹⁾によって発明された黒体空洞感温部を持つ光ファイバー温度計 (Optical Fiber Thermometer: OFT) は取扱いが容易で、使用限界温度も高く、ノイズも少なく高精度で、応答性にも優れていることが報告されたが、ディーゼル機関の燃焼ガス温度を直接測定する場合には極めて高い応答性が要求されるため、黒体空洞感温部を持つセンサーの時定数は十分でないことが鄭・鳥居²⁾によって示さ

れた。したがって、筆者ら³⁾⁴⁾はサファイヤ棒で製作されたライトパイプセンサーから成る OFT を用いて、燃焼火炎からの輻射エネルギーを直接計測し、燃焼火炎温度の時間履歴をいわゆる2色法により推定した。火炎温度計測システムはライトパイプセンサー、光ファイバーケーブルおよび光ファイバー温度計本体から構成されたが、センサーの測定対象領域およびセンサー受光部の燃焼に基づく汚損が計測精度上の重要な問題として報告された。

本報告では、使用済汚損センサーの再生利用方法を確立するとともに、光ファイバー温度計による高精度火炎温度計測を実現するため、試作黒体炉ならびに半導体レーザ光源を用いて、センサー受光部の形状とそ

平成6年4月28日受理

* 機械システム工学科 (Department of Mechanical Systems Engineering)

の受光特性、ファイヤセンサーおよび光ファイバケーブルの光伝送特性など基本的特性を明確にした。

2. 計測システムおよび供試センサー形状

2.1 温度計測システム

Fig. 1 に光ファイバ温度計システムを示す。本システムは、輻射エネルギー受光センサー、長さ約20mmの光ファイバケーブルおよび4チャンネル光ファイバ温度計 (Accufiber 社製モデル100) から成る。計測用ホルダーに装着されたライトパイプセンサーの先端受光部で受光された連続スペクトルの輻射エネルギーは、2本の光ファイバケーブルにそれぞれ分けて光ファイバ温度計へ伝送され、さらにそれぞれは内部で2つに分光され、中心波長の異なる光学フィルターを介してフォトダイオードによって輻射エネルギー強さが検出される。チャンネルAは中心波長が950nm および800nm の赤外域の2波長を、またチャンネルBは700nm および600nmの可視域の2波長につ

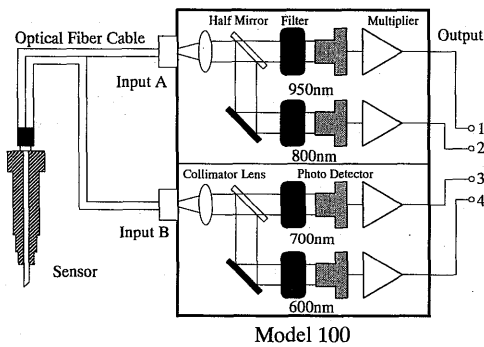


Fig. 1 Optical Fiber Thermometer System.

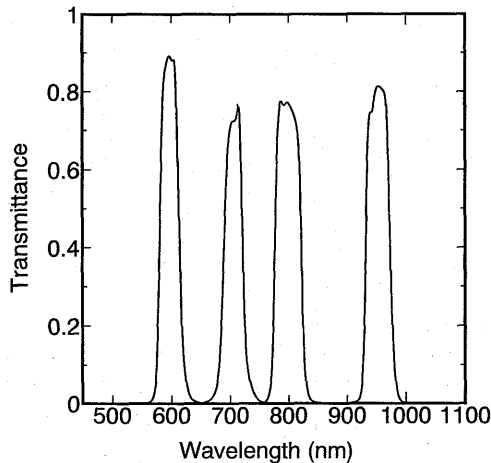


Fig. 2 Characteristics of Band Pass Filters.

いて輻射エネルギー強さを検出する。Fig. 2 は使用した光学フィルターの特性を、また Fig. 3 はフォトダイオードの特性を示す。

2.2 センサー形状および研磨方法

本研究では、Fig. 4 に示す直径1.27mm、長さ177mmの平滑なファイヤ棒で製作された2種のライトパイプセンサーを用いた。(a)は平坦先端型センサー、(b)は傾斜先端型センサーである。なお、平坦先端型の場合、センサー先端の軸に直角な端面が受光部であり、一方、傾斜先端型の場合、先端面がセンサー軸に対し45度の傾斜角をなし、この傾斜面に正対するセンサー円柱表面が受光部である。

筆者らは、これらのライトパイプセンサーの受光部端面を以下の方法で成形した。すなわち、(1)センサーを計測用ホルダーに装着した上で、平面度を維持しながら研磨できるように製作された治具に装着する。(2)

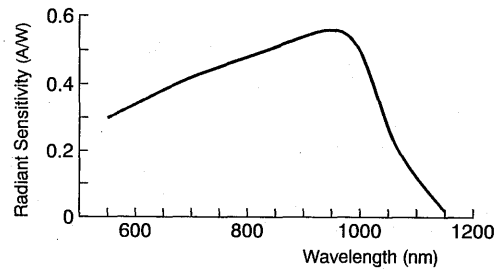


Fig. 3 Photodiode Characteristics.

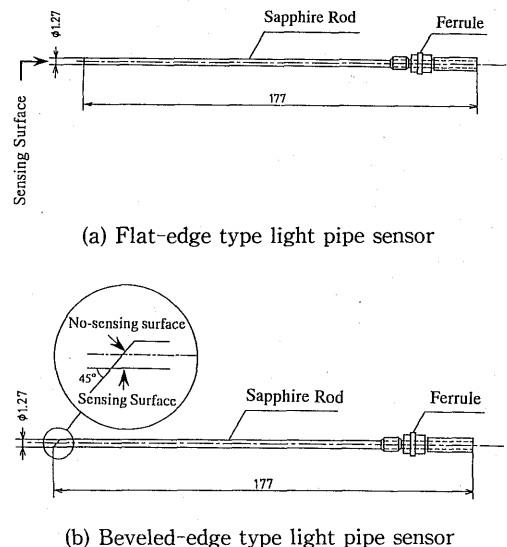


Fig. 4 Sensor Configuration.

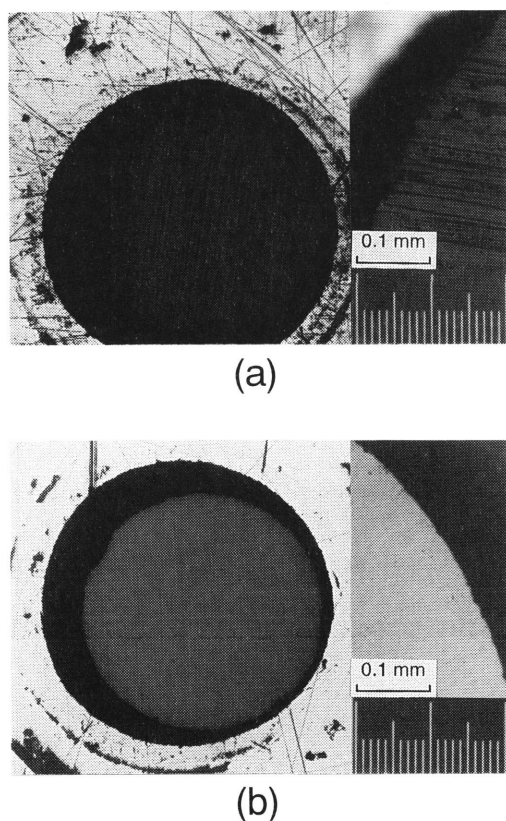


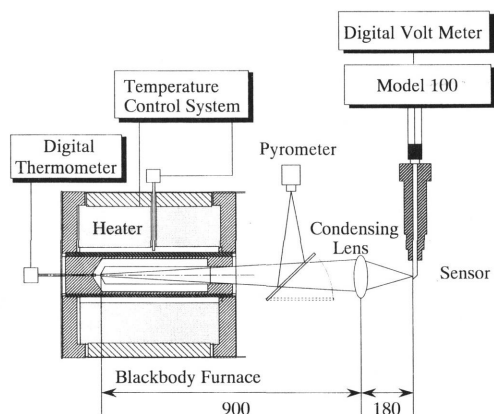
Fig. 5 Sensor Surface Roughness Condition.
 (a) Finishing surface by $13\mu\text{m}$ sandpaper
 (b) Finished surface by $1\mu\text{m}$ diamond paste

まず, JIS 粒度#240 (粒径 $67\mu\text{m}$) ないし#1200 (粒径 $13\mu\text{m}$) の研磨紙を用いて研磨すべき先端面の粗仕上げを行う。Fig. 5 (a)はその場合の面の粗さを示す。(3) さらに, 粒径 $3\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストを用いて第二段階の研磨を行う。最終仕上げは粒径 $1\mu\text{m}$ のダイヤモンドペーストを用いて研磨を行い, Fig. 5 (b)に示すような平滑な仕上げ面を得た。なお Fig. 5 は拡大率40倍と160倍の顕微鏡写真で, 図中の尺度は1目盛 $10\mu\text{m}$ である。

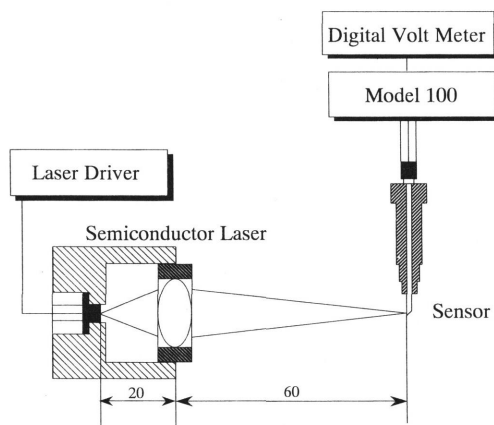
3. 検定装置

3.1 検定システム

Fig. 6 は光ファイバー温度計の受光特性を検定するための2種のシステムを示す。(a)は輻射エネルギー強さとOFT出力電圧の関係を検定するために, 光源として後述の黒体炉を用いたシステムである。黒体炉最深部のキャビティ底から集光レンズ(焦点距離 150mm , 直径 100mm)までの距離は 900mm , 集光レンズ



(a) With blackbody furnace



(b) With semiconductor laser

Fig. 6 Temperature Calibration System.

からセンサー受光部までの距離は 180mm で, キャビティ底に装着されたシース熱電対および放射温度計(ミノルタ製TR-630型)から黒体炉の真温度が推定された。センサー受光部における円錐状光束の半頂角は約 15° , その焦点直径はセンサー受光部直径 1.27mm に比べ十分大きく, 受光部に対応した黒体炉キャビティの測定対象領域は直径約 6.5mm の範囲である。なお, 光束の半頂角は後述のライトパイプセンサーの受光角度範囲とほぼ一致させており, 集光レンズによる輻射エネルギーの減衰率は約 8% であった。

一方(b)はセンサー受光部の測定対象領域すなわち受光角度特性を検定するために, 光源として半導体レーザを用いたシステムである。半導体レーザは中心波長 780nm , 出力 1mW で, レーザ光源から集光レンズ(直径 8mm , 焦点距離 14.5mm)までの距離は 20

mm, 集光レンズからセンサー受光部までの距離は60 mmで, センサー受光部におけるビーム径は約0.1mmのスポット焦点であり, センサー直径1.27mmに比べて十分小さい。

3. 2 試作黒体炉の特性

Fig. 7は試作黒体炉の断面を示す。黒体炉の炉芯は内径36mm, 端面からキャビティ底までの深さは235 mmで, その周りに薄い耐火セメント層および外径80 mmのセラミックス製炉芯管があり, その周りの隙間10mmの円筒状空洞部を介してモジュールヒータ(フィプロタル製 HLS, 内径100mm/外径250mm, 最高温度1200°C/640W)により加熱される。ヒータは耐火セメントおよびセラミックスファイバ質不定形耐火断熱材などで遮熱されており, これら全体が内径300 mm, 全長300mmの容器に納まっている。炉芯およびヒータ部の温度検知のため, 2本のシース熱電対を挿入しており, ヒータの入力制御はサイリスタレギュレータ(CHINO製 JS1030VA他)を用いた。

Fig. 8は黒体炉の作動特性の一例を示す。炉の温度制御はヒータ内側空洞部に装着された熱電対の支持値に対して行った。1000°Cの設定値に到達するのに約2時間を要し, さらに1100°Cに目標値を設定変更すると約30分で設定値に到達し, この時のキャビティ底の熱電対の指示値はそれぞれ $961 \pm 1^\circ\text{C}$ および $1060 \pm 0.5^\circ\text{C}$ であった。いずれの場合も, 炉の温度は極めて安定しており, キャビティ底の熱電対の指示温度がヒータ部温度より約40°C低いのは合理的と判断された。同時に計測された放射温度計による結果と比較することによって, 本試作黒体炉の放射率はほぼ1.0と推定された。なお, 本黒体炉は自然冷却であり, 図に示すような緩やかな温度降下特性を示す。

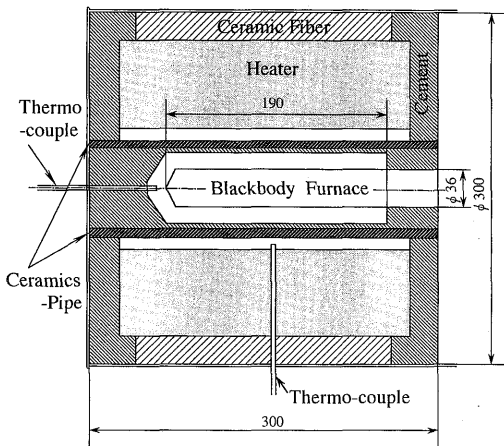


Fig. 7 Section of Blackbody Furnace.

4. センサーの受光特性

4. 1 センサーの受光角度特性

Fig. 6 (b)に示した半導体レーザーを光源とするスポット焦点型検定装置の精密トラバース装置に, Fig. 4 (a)および(b)に示した平坦先端型および傾斜先端型センサーをそれぞれ装着し, 受光部を回転中心としてピッチ角方向および仰角方向の受光角度範囲すなわち測定対象領域を調べた。Fig. 9 (a)は平坦先端型センサーのピッチ角方向受光特性を, Fig. 9 (b)および(c)は傾斜先端型センサーのピッチ角および仰角特性をそれぞれ示す。

いずれの場合も受光面に垂直な方向において最大の受光率が得られ, 受光率が90%減衰する角度範囲は, 平坦先端型および傾斜先端型のピッチ角方向で $\pm 10^\circ$, 傾斜先端型の仰角方向で $\pm 15^\circ$ と極めて狭い角度範囲である。仰角方向の受光角度範囲がピッチ角方向のそれより広いのは, 受光面が仰角方向には曲率を持つためである。なお, Fig. 9 (b)および(c)の傾斜先端型センサーについては, 受光側円柱表面と非受光側傾斜面の両方について受光特性を示したが, 非受光側傾斜面のピーク受光率が約3%であることから, 傾斜面の全反射率は97%と推定される。

同様の受光角度特性を Fig. 6 (a)に示した黒体炉検定装置で調べた結果を Fig. 10 (a), (b)および(c)にそれぞれ示す。受光率が90%減衰する角度範囲は, 平坦先端型および傾斜先端型のピッチ角方向で $\pm 20^\circ$, 傾斜先端型の仰角方向で $\pm 40^\circ$ で, いずれの場合も上述のスポットビームによる検定値の約2倍の受光角度幅を示す。これは本検定装置のセンサー受光部における円錐

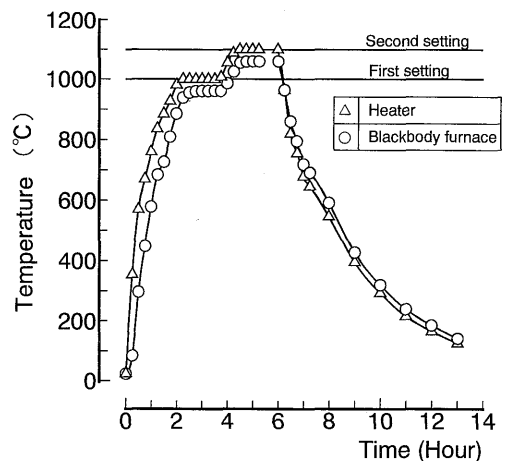
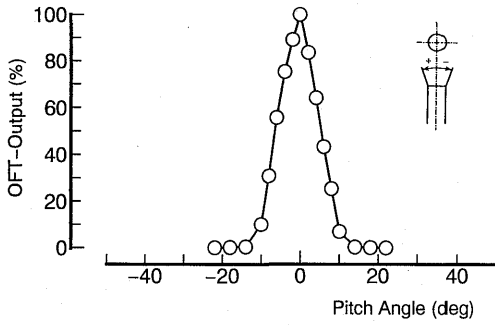
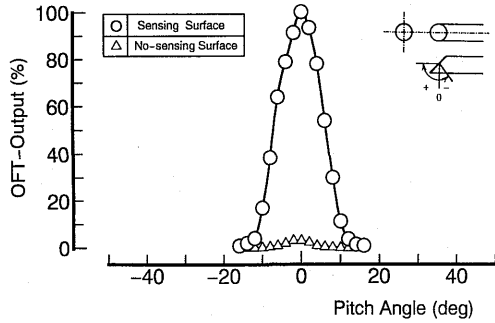


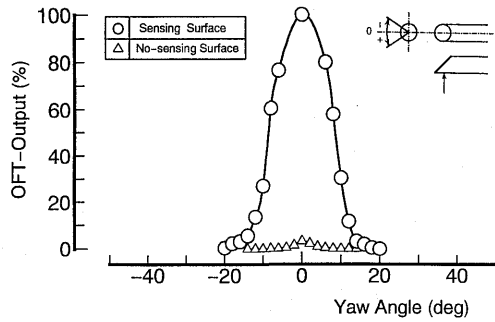
Fig. 8 Operational Characteristics of Blackbody Furnace.



(a)



(b)



(c)

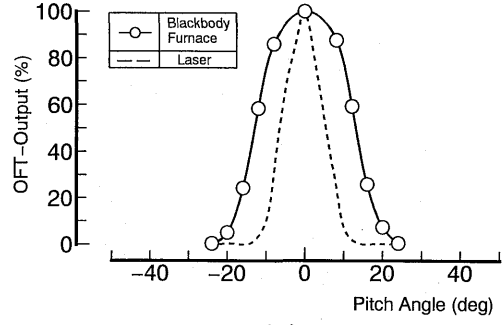
Fig. 9 Sensor View Angle Characteristics by the Point Laser Source.

- (a) Flat-edge sensor (Pitch angle)
- (b) Beveled-edge sensor (Pitch angle)
- (b) Beveled-edge sensor (Yaw angle)

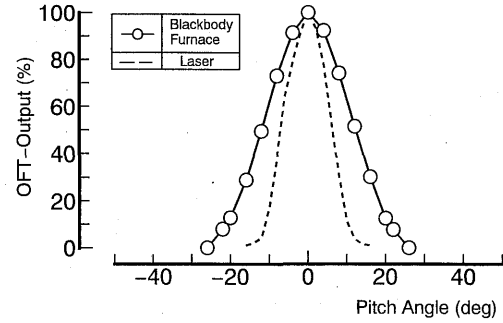
状光束の半頂角が約15度であることに起因しており、Fig. 9の結果と光束の半頂角から理論的に推定される受光角度幅ともほぼ一致することから、Fig. 9が本センサーの受光角度特性と判断された。

4. 2 光ファイバーセンサーの総合的受光率

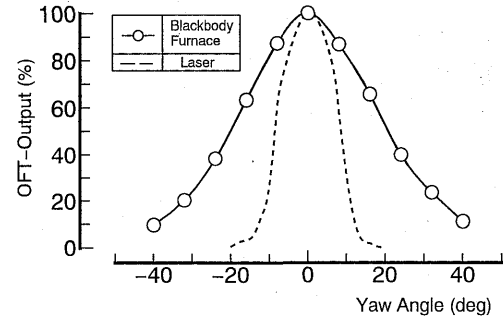
黒体炉検定装置において、2種のセンサーをそれぞれ



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 Sensor View Angle Characteristics by the Blackbody Furnace.

- (a) Flat-edge sensor (Pitch angle)
- (b) Beveled-edge sensor (Pitch angle)
- (b) Beveled-edge sensor (Yaw angle)

れ約20mの光ファイバーケーブルおよび光ファイバー温度計と接続した場合、およびセンサーを接続しないで直接光ファイバーケーブルの端面を受光部とした場合をそれぞれ比較することによってセンサーの受光率を調べた。Fig. 11は光ファイバー温度計で計測された輻射エネルギー強さと黒体炉が放射する輻射エネルギー強さの比を示す。実験では、4種の波長について

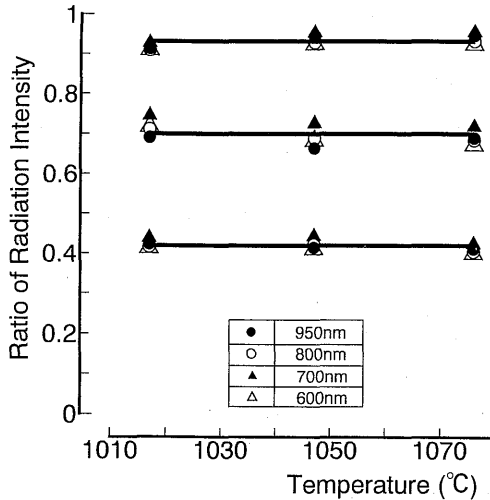


Fig. 11 Decrement of Radiation Energy Received by Sensors.

て黒体炉温度を3通り変化しており、Fig. 11 上段は光ファイバケーブル単体の輻射エネルギー通過率、中段は平坦先端型センサーの場合、下段は傾斜先端型センサーの場合を示す。なお、これらの値は、黒体炉検定装置の集光レンズにおける輻射エネルギー減衰率の補正を行っている。

図から判るように、輻射エネルギー通過率は、黒体炉温度および波長にほとんど依存せず、平均値はそれぞれ上から順に、0.932、0.693および0.419であった。すなわち、輻射エネルギー強さは、約20mの光ファイバケーブルにおいて6.8%減衰し、同ケーブルと平坦先端型センサーの組み合わせでは30.7%、また同ケーブルと傾斜先端型センサーの組み合わせでは58.1%減衰している。これらの減衰の原因として考えられることは、第一に、センサー受光面における表面反射、第二にサファイヤセンサー内部における内部散乱、第三に接続部における散乱である。傾斜先端型が平坦先端型より減衰率が高いのは、センサー受光面が曲率を有すること、および傾斜面における全反射率が100%でないことなどに起因している。

Fig. 12 は光ファイバ温度計システムの総合的光伝送特性を含んだ傾斜先端型センサーの受光特性、すなわち、光ファイバ温度計出力と黒体炉温度から計算される輻射エネルギー強さとの関係を、950nm、800nmの赤外域2波長、および700nm、600nmの可視域2波長について、実験点と太い最小自乗近似直線で示す。この関係は一般的ではなく、センサー受光面の汚損状態にも依存することが既に知られている³⁾。センサー

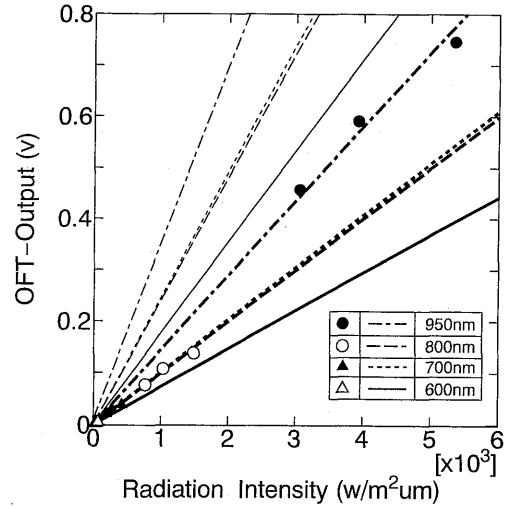


Fig. 12 Relation between OFT-output and Radiation Intensity.

および光ファイバケーブルに依存しない本システムの一般的な両者の関係は、Fig. 11 下段に示した総合的通過率の逆数をそれぞれの勾配に掛けることによって得られる Fig. 12 の細い4本の直線関係である。

5. む す び

本報告では、センサー受光部の再生研磨方法を確立するとともに、光ファイバ温度計による高精度火災温度計測を実現するため、黒体炉検定装置ならびに半導体レーザー光源検定装置を製作し、これらを用いてサファイヤセンサー受光部の形状とその受光角度特性、センサーおよび光ファイバケーブルの光伝送特性などの基本的特性を明確にした。

謝辞：本実験において、本学大学院生山田 武・吉永憲生両君の、また図面作成では坂口大作助手の協力があつたことを記して謝意を表する。

参考文献

- 1) Dils, R. R., J. of Applied Physics, 54-3 (1983), 1198.
- 2) 鄭奇・鳥居, 機論, 58-548 (B) (1992), 1187.
- 3) 石田ほか5名, 機論, 58-555 (B) (1992), 3482.
- 4) 石田ほか5名, 機論, 58-555 (B) (1992), 3489.