

ISSN 0452-2928
UDC 534.08

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-535

動翼振動監視装置の研究(I) (光ファイバによる動翼先端検出器)

松 田 幸 雄 ・ 遠 藤 征 紀

1984年7月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. はじめに	1
2. センサの構成方法と性能評価	3
2.1 構成方法	3
2.2 性能評価	4
3. 光ファイバプローブ	5
3.1 光ファイバとバンドルファイバの一般的性質	5
(1) 光の入射と放射の性質	5
(2) 端面反射による損失	6
(3) バンドルファイバの透過率	8
(4) 構造的性質	9
3.2 光ファイバプローブの特性	9
(1) 計算によるプローブの出力特性の推定	10
(2) 試作プローブの出力特性の測定	12
(3) 試作プローブの出力波形	16
4. 光源と受光素子及び信号処理回路	22
4.1 光源の選択	22
4.2 受光素子の選択	23
4.3 信号処理回路	25
5. 動翼先端検出器	26
5.1 検出器の出力信号電圧	26
5.2 検出器の測定誤差	29
5.3 検出器の出力信号と実機装着例	31
(1) 空力試験機 F30 の動翼振動計測	32
(2) FJR710 ファン動翼振動計測	35
6. 高温用冷却アダプタの試作	36
6.1 プローブ冷却アダプタの試作	36
6.2 実機装着型冷却アダプタ	38
7. まとめ	40

動翼振動監視装置の研究(I)* (光ファイバによる動翼先端検出器)

松田 幸雄** 遠藤 征紀**

1. はじめに

光ファイバを応用したセンサ・計測法は、従来の計測法に比べ多くの特長がある。これは光応用計測が本質的に非接触計測であること、応答性が良いこと、及び光ファイバが小型・軽量でフレキシビリティに富んでいること、耐環境性（電磁雑音など）に優れているなどの特長を同時に併せ持つことによる。光ファイバを応用したセンサは、1) 光ファイバ自体がセンサとして動作するもの、2) 光ファイバ端にセンサを付加して、光ファイバは単に光の伝送路として用いられるもの、に分けられる。前者は光の位相、偏向などの性質を利用するため、単一モード光ファイバを使用し構成が複雑で、現在実用化されているものはほとんど無い。後者の方法によるセンサは、光の振幅（光量）変化を扱うため既に多くの応用例があり、これはまた、a) 放射側光ファイバと

集光側光ファイバの間にセンサを置き、光の伝送量変化を検出量とするもの、b) 光を出力とするセンサや、一般センサ出力を電気-光変換して光ファイバにより信号を伝送するもの、とに分けられる。本報告で述べるセンサはa)に属するもので、光の伝送量のオンオフを検出量とする。

筆者等は本センサをガスタービン、圧縮機などの動翼振動を、非接触に計測する新しい計測法¹⁾のセンサとして開発した。この計測法に用いる動翼振動監視システムは、図1に示すようにケーシングに装着した光ファイバセンサ（複数）と光源、信号処理回路、データ収集装置及びデータ処理装置で構成する。ここで光ファイバセンサは、光源からの入射光を光ファイバでセンサ検出端に導き放射する。いま放射光束中を動翼が通過すると、翼端表面にて放射光を反射する。センサ検出端ではこれを集光して光電素子に導き、信号処理回路にて1枚の動翼通過に

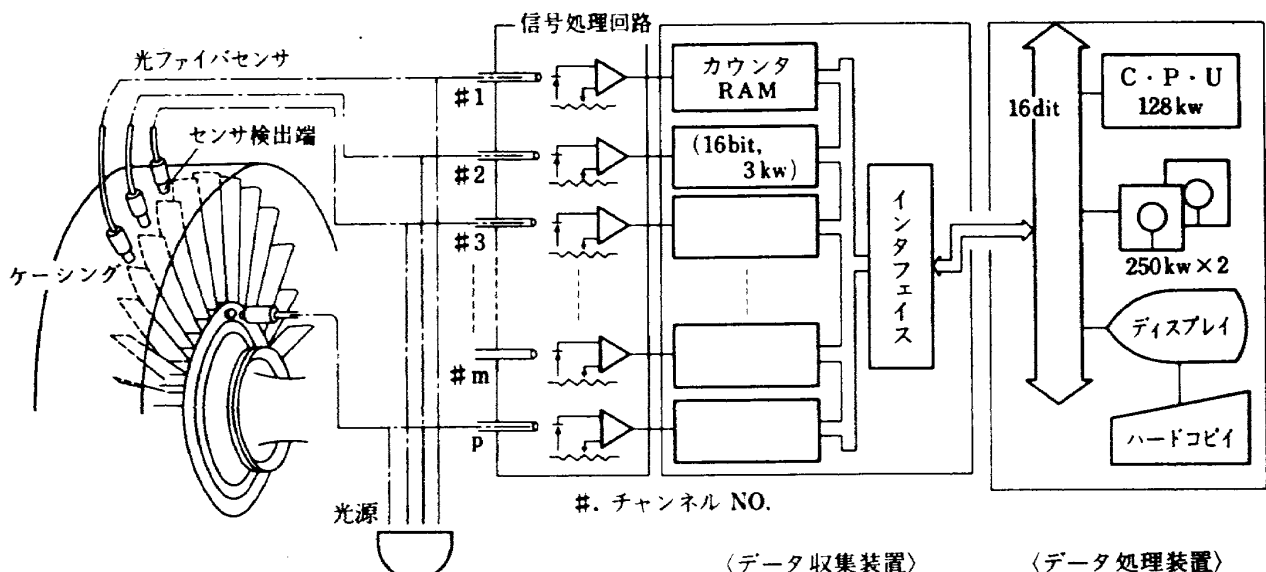


図1 動翼振動監視システム

* 昭和59年5月31日受付

** 原動機部

対して 1 個のパルス出力を得る。

データ収集装置では各検出器ごとに、このパルス発生時刻を次々とカウントし、同時にこのカウント値を、メモリ (R.A.M) に蓄え、一定時間終了後にデータ処理装置に転送する。ここで動翼が振動している時のカウント値と、振動していない時のそれとを計測してその差を求めると、これは各動翼が各センサの検出端を通過した時刻における振動振幅になる。

以上は本センサを用いた動翼振動計測の概略であるが、これより必要とされるセンサの性能は、動翼のセンサ検出端通過時間に対して十分な応答性を有すること、振動する動翼に対しても信号出力が安定して得られることが要求される。従来このような用途には、電磁型（動翼通過によるセンサのインダクタンス又はリラクタンス変化を検出）及び静電型（キャパシタンス変化を検出）のセンサが用いられたが、応答性、耐環境性（電磁雑音、温度、湿度）、出力信号波形に難点がある。これに対して光ファイバを応用した光センサでは、先に述べた理由により常に安定した動作と信号出力を得ることが可能である。

本報告はセンサの構成方法及び各構成要素について試作、検討を行なった結果と、これより製作したセンサをジェットエンジン等に装着して動作させた結果について述べる。²⁾³⁾⁴⁾

記号及び文字

A_{pd} : 受光素子感度
 α : 反射体の幅
 D_b : 放射端（検出端）のバンドル直径
 D_{co} : 光ファイバ素線のコア直径
 D_{cr} : 光ファイバ素線のクラッド直径
 d : 反射体とプローブ間距離
 E_{pd} : 受光素子出力電圧
 $g_{(k)}$: 受光素子出力電圧の立ち上り波形を表わす
 I_c : 送光側放射光量
 I_o : 受光側集光光量
 L_i : 光源結合損失
 L_p : 受光素子結合損失
 L_r : 反射損失
 L_T : プローブの全損失

L_t : バンドルファイバの伝送損失
 L_{tr} : 受光側伝送損失
 L_{ts} : 送光側伝送損失
 l : 光源と送光端距離
 l_r : 受光側長さ（検出端～受光端長さ）
 l_s : 送光側長さ（検出端～送光端長さ）
 m : 送光側光ファイバ素線 [S] と受光側光ファイバ素線 [R] の本数比
 m_r : [R] の本数
 m_s : [S] の本数
 n_0 : 外界の屈折率
 n_1 : コアの屈折率
 n_2 : クラッドの屈折率
 $N.A.$: 開口数
 P_a : 光源光パワー密度
 P_i : 光入射光パワー
 P_o : 出力光パワー
 P_{pd} : 受光素子入射光パワー
 P_r : 反射光パワー
 P_s : 放射光パワー
 \bar{P}_o : 比出力
 S_i : 送光端面面積
 t_d : 時間遅れ
 $t_1, t_2, t_a, t_b, t_m, t$: 時間を表わす
 V_a : 出力電圧の最大値
 V_b : 出力電圧の最小値
 V_m : 出力電圧の平均値
 V_{th} : スレッシュホールド電圧値
 \tilde{V}_o : E_{pd} の電圧変動率
 \bar{V}_{th} : V_{th} の V_m に対する比
 X_i : 入射効率
 X_r : 反射効率
 X_{rt} : 反射透過率（受光側）
 X_t : バンドルファイバの透過率
 X_{ts} : 送光側透過率
 x : プローブと直角方向の座標
 x_m : [S] と [R] 間距離
 α : 光ファイバに対する光の入射角
 $\tilde{\delta}_1, \tilde{\delta}_2$: 測定誤差
 θ : プローブと反射体との相対角度
 θ_{max} : 開口角

- θ_{sr} : [S]と[R]の中心軸のなす角度
 λ : 光の波長
 ρ_r : 表面反射率
 σ_{fd}^2 : 光ファイバ放射光束のガウシアン分布での分散
 χ : 光ファイバ素線の種類を表わす。
 χ_g : 光学ガラス系光ファイバ素線を表わす
 χ_s : 石英ガラス系光ファイバ素線を表わす
 χ_{sg} : χ_s と χ_g の混合形を表わす
 ϕ : 反射体の表面状態を表わす
 ϕ_f : 一般炭素鋼表面を表わす
 ϕ_m : 鏡面を表わす
 \mathcal{Q} : バンドル方法を表わす
 \mathcal{Q}_R : ランダム型を表わす。
 \mathcal{Q}_C : 同軸型を表わす
 \mathcal{Q}_H : 半円型を表わす

2. センサの構成方法と性能評価

2.1 構成方法

光ファイバにより回転動翼先端の通過を検出するセンサは、図2に示すように反射体(回転動翼)に光を放射する光ファイバ「F_s」(送光側光ファイバとする)と、反射体からの反射光を集光する光ファイバ「F_r」(受光側光ファイバとする)を角度 θ_{sr}

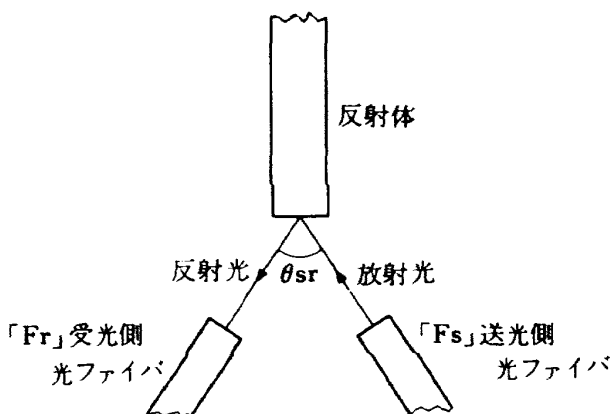


図2 センサの基本的構成

ファイバ「F_r」(受光側光ファイバとする)を角度 θ_{sr} で配置する形になる。ここで θ_{sr} は一般に 0° とするのが構造上簡単で、かつ放射光に対して集光できる光量の割合も多いと考えられる。従って実際のセンサ構成方法としては、1)「F_s」「F_r」を1本の光ファイバで兼ねる、2)「F_s」「F_r」を平行に置く、の2種類の方法が考えられる。図3は1)の方法を示したもので、ハーフミラーにより光源からの送光分と、反射光からの受光分とを分岐している。この方法では、ハーフミラーでの光結合調整、収束レンズとの結合など構成が複雑になり、結合による損失も大きく、価格も高い。図4は(2)の方法を示したもので、実際には「F_s」「F_r」ともに多数本束ねた光ファイババンドル(以下バンドルファイバと言う)として使用する。この方法では構成が単純で取扱いが容易であり、本報告の計測目的のように多数本のセンサを必要とする場合には有利である。以上より筆者等は2)の構成方法によるセンサを採用した。図5にセンサの全体を示す。本報告では光源光入射側を送光端、受光側を受光端、反射体側を放射端又は検出端と呼び、光ファイバ部分を光ファイバプローブ、(または単にプローブ)とすることにする。

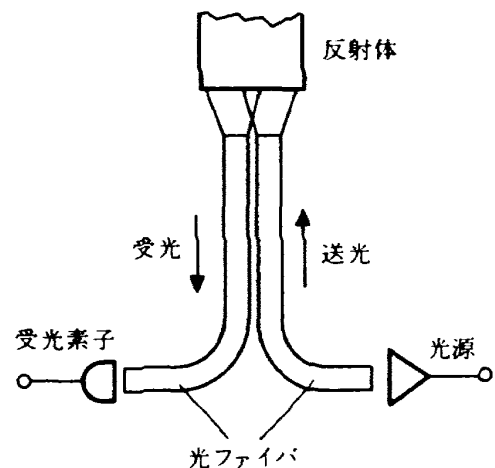


図4 センサ構成方法(2)

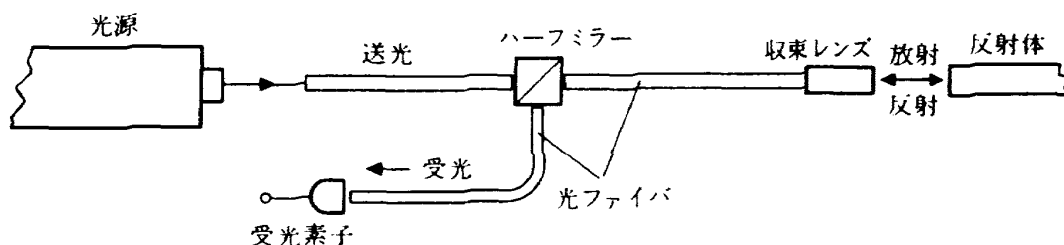


図3 センサ構成方法(1)

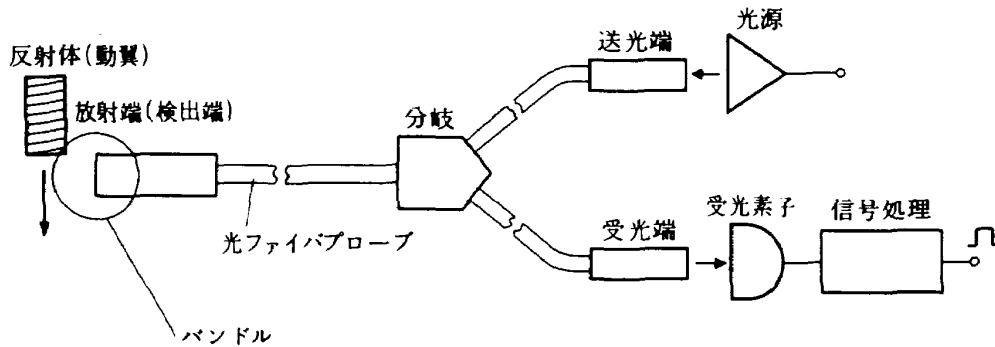


図5 動翼先端検出器の構成

図5にて送光側光ファイババンドルと受光側光ファイババンドルは、放射端～分岐間にて1本のバンドルファイバとして混ぜ合わせて束ね、放射端面ではそれぞれ適当な配置にしてある。ここでバンドルされる光ファイバは、コア径数十～数百 μm で、光ファイバ素線と言うことにする。また本報告では図5の全体を一つの検出器と考え、光ファイバプローブ、光源、受光素子及び信号処理部を構成要素とするセンサ、「動翼先端検出器」（または単に検出器）と呼ぶことにする。

2.2 性能評価

検出器の性能評価の為に、まず光源から光ファイバプローブ（以下プローブとする）の送光端へ入射する光のパワーが、反射体（動翼先端表面）への放射、反射、集光を経て受光素子に達する過程を明らかにする。図6は光源光パワーが、最終的に受光素子の受光面に入射される受光パワー（プローブ出力）に減衰する過程を表わしたもので、各損失の定義を次に示す。なお本報告では、光パワー（放射束）及び光パワー密度（放射発散度）の単位をそれぞれ W 、 W/cm^2 とする。

a) 光源結合損失 L_i

光源結合損失 L_i は、光源光を送光端に注入する時の光のパワー損失であり、入射効率を X_i として次式のように定義する。

$$L_i = 10 \log_{10} X_i \quad [\text{dB}] \quad (1)$$

入射効率 X_i は、 P_a を光源光パワー密度、 S_i を送光端面面積として次のように定義する。

$$X_i = P_i / P_a \cdot S_i \quad (2)$$

ここに P_i はプローブに注入される光源光パワーで、直接測定することはできない。

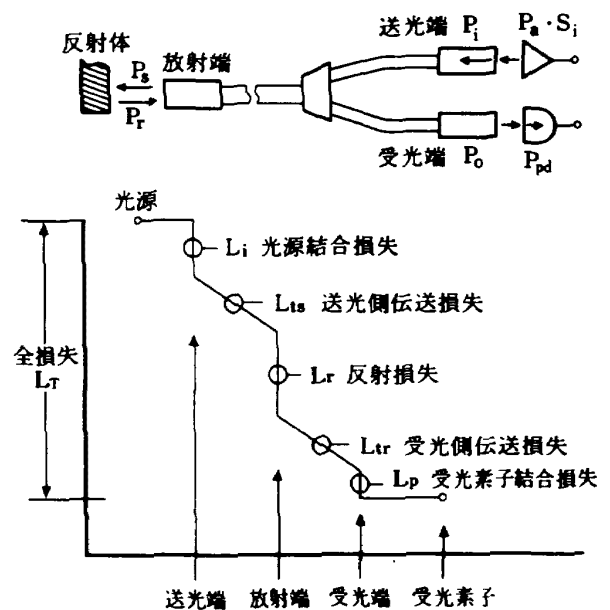


図6 プローブにおける光パワーの損失過程

b) 送光側伝送損失 L_{ts}

送光側伝送損失 L_{ts} は、プローブに入射した P_i が放射端に達する間の光のパワー損失で、次のように定義する。

$$L_{ts} = 10 \log_{10} (P_s / P_i) \quad [\text{dB}] \quad (3)$$

ここに P_s は放射端から放射する光パワーである。いま送光側プローブの透過率 X_{ts} を次式で定義する。

$$X_{ts} = P_s / P_a \cdot S_i \quad (4)$$

これより(3)式は次のようになる。

$$\begin{aligned} L_{ts} &= 10 \log_{10} (P_s / P_a \cdot S_i \cdot P_a \cdot S_i / P_i) \\ &= 10 \log_{10} X_{ts} - L_i \end{aligned} \quad (5)$$

X_{ts} は直接測定が可能であるから、実際には $L_{ts} + L_i$ とした損失を評価する。

c) 反射損失 L_r

反射損失 L_r は、 P_s が反射体で反射され、放射端に達する間の光パワー損失で、反射効率 X_r より次のように定義する。

$$L_r = 10 \log_{10} X_r \quad [\text{dB}] \quad (6)$$

X_r は P_r を放射端面に反射される光パワーとして、次のように定義する。

$$X_r = P_r / P_s \quad (7)$$

d) 受光側伝送損失 L_{tr}

受光側伝送損失 L_{tr} は、 P_r が受光端に到るまでの光パワー損失で、次式のように定義する。

$$L_{tr} = 10 \log_{10} P_o / P_r \quad [\text{dB}] \quad (8)$$

ここに P_o は受光端で得られる出力光パワーである。ここで P_r は実測が不可能であるので、直接測定が可能な値として受光側プローブの反射透過率 X_{rt} を次のように定義する。

$$X_{rt} = P_o / P_s \quad (9)$$

これより (8) 式は次のようになる。

$$\begin{aligned} L_{tr} &= 10 \log_{10} (P_o / P_s \cdot P_s / P_r) \\ &= 10 \log_{10} X_{rt} - L_r \end{aligned} \quad (10)$$

実際の損失測定、評価では $L_{tr} + L_r$ として求める。

e) 受光素子結合損失 L_p

受光素子結合損失 L_p は、 P_o が最終的に受光素子に入射する間の結合損失で、次のように定義する。

$$L_p = 10 \log_{10} P_{pd} / P_o \quad (11)$$

ここに P_{pd} は受光素子が受けとる光パワーである。

f) 受光素子感度 A_{pd}

受光素子感度は、 P_{pd} に対する出力電圧 E_{pd} の光電変換値であり、次のように定義する。

$$A_{pd} = E_{pd} / P_{pd} \quad [\text{V/W}] \quad (12)$$

A_{pd} の値は、使用する受光素子の特性で示されるが、ここでは光の波長を単一とした値を用いる。

g) 全損失 L_T と出力電圧

以上よりプローブの全損失 L_T は、次のように表わせる。

$$L_T = (L_i + L_{ts}) + (L_r + L_{tr}) + L_p \quad (13)$$

これより出力電圧 E_{pd} は次のようになる。

$$E_{pd} = P_a \cdot S_i \cdot A_{pd} \cdot 10^{L_T/10} \quad (14)$$

以上述べた損失、出力電圧は、反射体が静止している場合であるが、実際の測定では反射体が移動しているため、検出端と反射体の位置関係が時間とともに変化し、従って L_r が時間により変化すると考えられる。これより全損失 $L_T(t)$ 、出力電圧 $E_{pd}(t)$ はそれぞれ次のように表わせる。

$$L_T(t) = L_r(t) + (L_i + L_{ts}) + L_{tr} + L_p \quad (15)$$

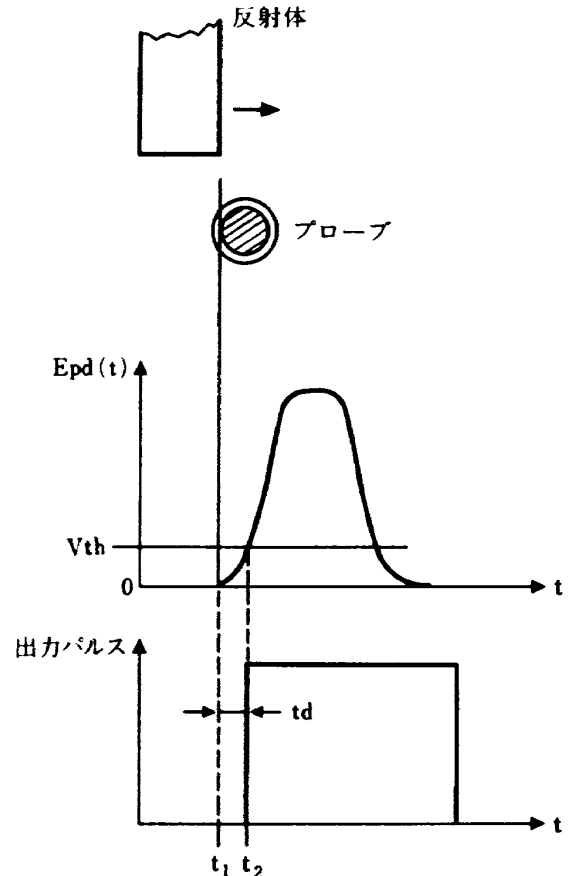


図7 受光素子出力電圧

$$E_{pd}(t) = P_a \cdot S_i \cdot A_{pd} \cdot 10^{L_T(t)/10} \quad (16)$$

図7は $E_{pd}(t)$ を示したもので、 V_{th} とは $E_{pd}(t)$ をパルス波形に整形するコンパレータのスレッシュホールド電圧で、 $E_{pd}(t) \geq V_{th}$ で出力パルスを得る。また図より反射体がプローブの放射端面上を通過し始める時刻 t_1 より、パルスが立ち上る時刻 t_2 までの時間遅れを t_d とすれば、 t_d の変動が本検出器の測定誤差になる。

3. 光ファイバプローブ

3.1 光ファイバとバンドルファイバの一般的性質

1) 光の入射と放射の性質⁵⁾

光ファイバの概略の構造を図8に示す。光ファイバは屈折率の異なる2種類の透過物質を同軸状に積層したもので、内側の層をコア、外側の層をクラッドと言う。図は両者の屈折率分布が階段状に作られているステップインデックス型を示している。光の伝送はコアとクラッドの境界における光の全反射により行なわれるが、図で示すようにコアに入射する光は、全反射が生じる限界の角度 θ_{max} 以上ではクラッドを突き抜けるため、光の入射は $\alpha \leq \theta_{max}$ の範

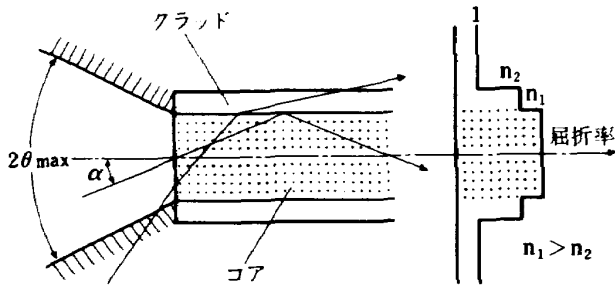


図8 光ファイバの一般的性質

用で行なわれる。ここに θ_{max} を開口角と言ひ、光ファイバの特性値として一般的な開口数 N.A とは次に示す関係がある。

$$\theta_{max} = S_{in}^{-1}(N.A) \quad (17)$$

一方光ファイバからの放射も θ_{max} の範囲内で行なわれるが、実際の放射分布は光源側（光注入側）の入射光の入射角度に対する光の強度分布により大きく変わる。そこで入射と放射の分布を開口角の異なる2種類のバンドルファイバを用いて測定した（光ファイバ素線1本についての特性測定は、光量が微小のため不可能である。ここではバンドル径、 $D_b = 1\phi$ のバンドルファイバを用いて、近似的に特性測定を行なった）。

測定用光源には、白色光として用いられるキセノン放電管を付図1に示すように、レンズを用いて光源放射光束の軸方向光強度分布が、半径方向に均一になるよう設定して用いた。図9に測定用光源の光パワー密度分布と、得られた光パワー値を示す。図で縦軸には最大値を1とした比出力を、横軸には光源光の中心からの距離をとった。また入射特性の測定方法を付録(2)に、これより求めた測定結果を図10に示す。これは入射光束の中心軸と、バンドルファイバのなす角度 α に対する入射光パワーを求めた結果で、横軸には α/θ_{max} 、縦軸には最大値を1とした比出力をとった。これによれば光の入射は、ほぼ θ_{max} の範囲内で均一に行なわれることがわかる。

次に図11は付録(3)の方法で測定した放射分布特性の測定結果で、座標軸は図10と同じである。図11-(a)は入射光に測定用光源を用いた場合で、放射分布は鋭い形になる。これは入射光束分布が図12-(a)に示すようにビーム状の光束である為で、もしこれが図12-(b)に示すように θ_{max} の範囲内で均一な入射光束分布を持つ光源であれば、放射光分布の形状

測定用光源(キセノン放電管)
絞り 5φ 絞りから 10cmの点

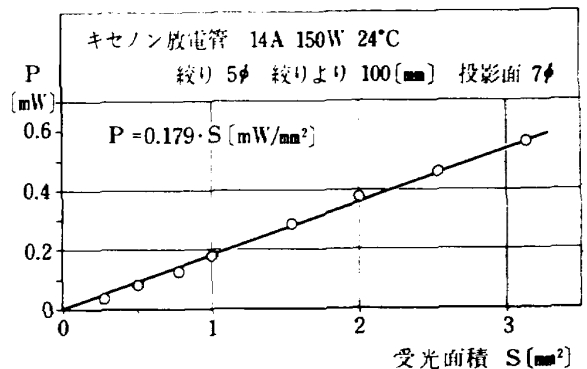
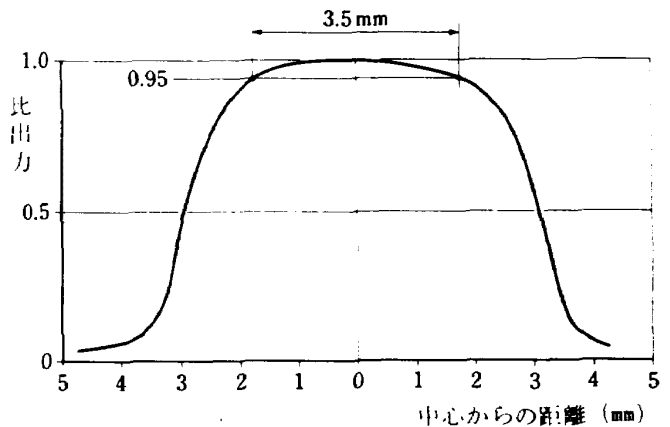


図9 測定用光源の光パワー密度と分布

は図10と同様になると考えられる。その例として発光ダイオードを光源とした場合の放射光分布を図11-(b)に示す。ここで用いた発光ダイオードは、発光面に球レンズを付着させて光放射指向特性を改善したもので、バンドルファイバへの光入射は測定用光源より図12-(b)に近い形で行なわれている。この様に光ファイバの放射分布特性は、光源の入射光束の拡がり程度によりかなり変化する為、先に述べたプローブの諸損失に大きく影響する。従って性能評価では光源の入射光束を条件として規定する必要がある。本報告では上述した図9の入射光束分布を持つ測定用光源を、測定に用いることにする。

2) 端面反射による損失

光ファイバ素線の透過率は、a) 光の入射、放射時の端面で生じる反射損失、b) 光ファイバ内の吸収、散乱による損失、でほぼ決定される。a) は端面反射損失と呼ばれるもので、条件として光が端面に垂直に入射し、端面が光学的に平面であると仮定すれば、フレネルの法則⁵⁾により端面の表面反射率 ρ_r は、次のように求められる。

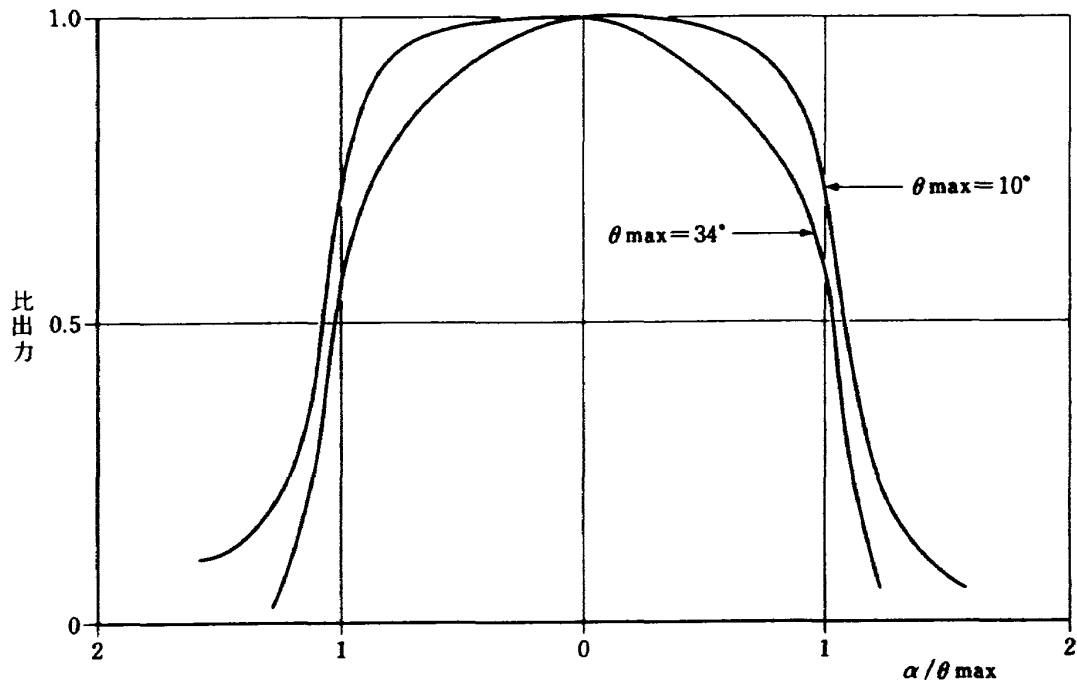


図10 光ファイバの入射特性

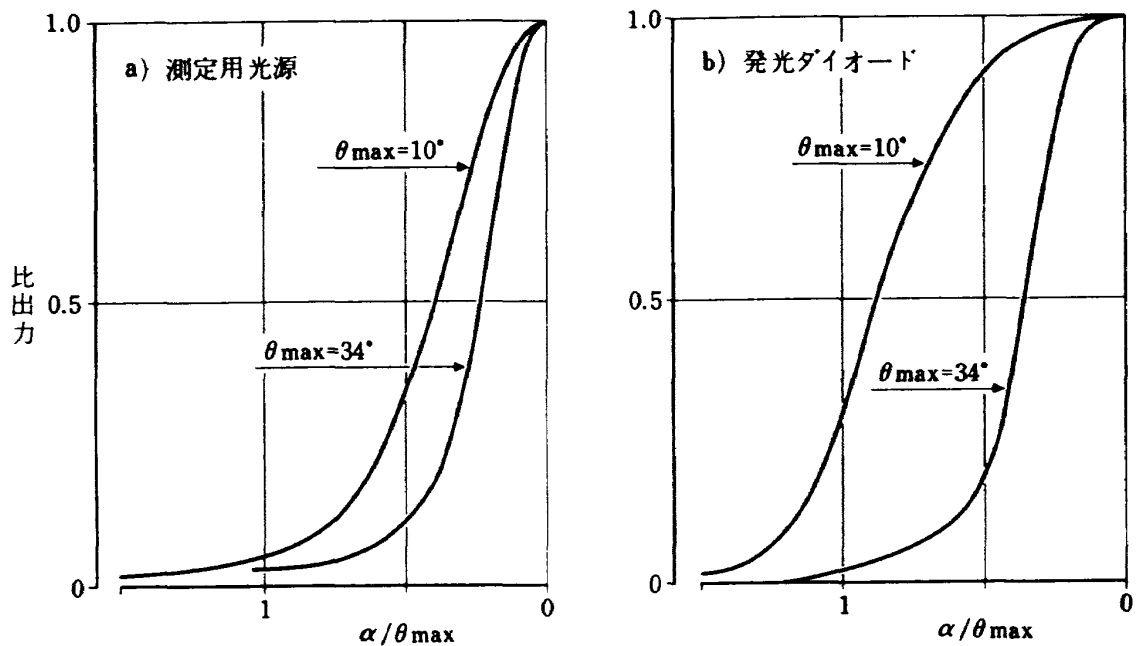


図11 光ファイバの放射分布特性

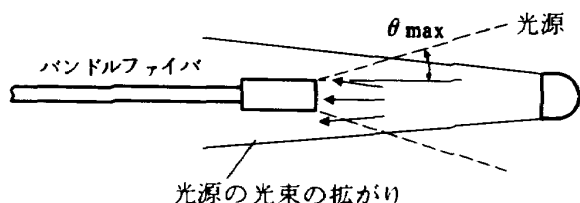
$$\rho_r = (n_1 - n_0)^2 / (n_1 + n_0)^2 \quad (18)$$

ここで n_1 はコアの屈折率、 n_0 は外界の屈折率である。しかしながら実際の光ファイバでは、端面の研磨状態に応じさらに反射率は大きくなり、これは5～10%と言われている。b) の光ファイバ内の損失は、コアの材質、ガラスの純度で異なり、また透過光の波長に対して大きく変化する。一般に光ファイバの材質としては石英ガラス系、多成分光学ガラス系、プラスチックがあり、透過率は各製品により多少差がみられる。その一例として図13に市販され

ている光学ガラス系とプラスチックファイバの白色光透過率を示す(市販製品の特性図より作成⁶⁾)。図より透過率には端面反射損失が20%程度含まれていることがわかる。石英系ファイバでは透過率は極めて良く、光ファイバの全長が10～20m程度では損失は端面反射損失のみである。

次にプローブとして用いるバンドルファイバでは、光を入射する面積 S_i を送光端全体と考えることから、送光端での各光ファイバ素線のクラッド部、接着剤部分等の非光入射面積が存在する。これによる

a) ビーム状光束



b) 均一に入射する光束

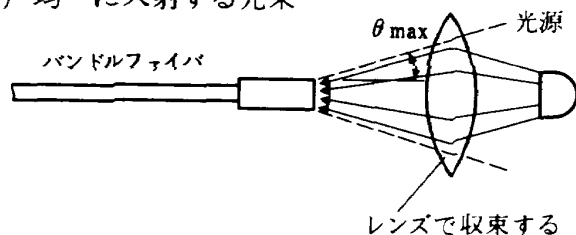


図 12 入射光束分布の説明

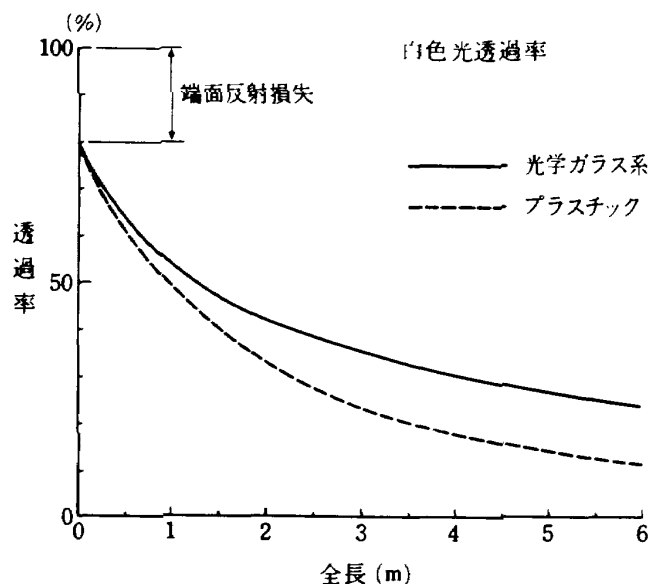
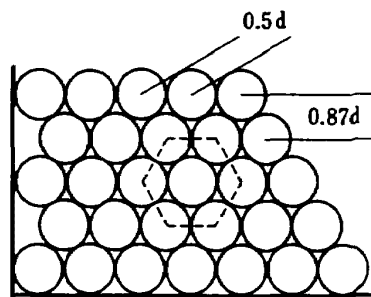


図 13 光学ガラス系とプラスチックファイバーの透過率

損失を端面反射損失とすれば、これはバンドルファイバを製作する上での充填率（クラッド総面積／バンドル面積）で表わすことができる。いま理想的な状態として図 14 のように束ねたとすれば、充填率は 90 % となるが、実際には円形に束ねること、各光ファイバ素線径バラツキがあることなどで 70 % 程度である。また一般に光ファイバ素線径が大きくなるにつれ充填率は低くなるが、特に石英ガラス系ファイバでは光ファイバ素線径のバラツキが 5～10 % 程度あり、径自体も太く、石英ガラス自体が弱いのでクラッドの外側にプリコートと呼ばれる保護外皮をつけるため、充填率は 60 % 以下になる。以上述べたのはバンドルファイバ製作上の充填率である



充填率 = 0.9

図 14 バンドルの充填率（理想的状態）

が、光の入射を考えた場合の実充填率（コア総面積／バンドル面積）は、コア径／クラッド径の値が 0.1～0.2 であるから、充填率よりさらに 10～20 % 下回る。

以上よりバンドルファイバとしての端面反射損失は次のように考えることができる（各値は % で表わす）。

$$\text{端面反射損失} \div 2 \cdot \rho_r + \text{実充填率} + (\text{端面研磨状態に応じた損失})$$

3) バンドルファイバの透過率 X_t

試作したプローブに用いた光ファイバ素線の仕様を表 1 に示す。これより ρ_r は (18) 式より光学ガラス系で 5.6 %、石英系で 3.4 % と求められる。従ってバンドルファイバとしての端面反射損失は、光学ガラス系で 40～50 %、石英系で 50～60 % と推定できる。透過率の測定には、表 1 の光ファイバ素線を $1\phi \sim 1.5\phi$ に束にしたものを数本（長さ 0.5～3.0m）試作した。測定は付録(1)に示した測定用光源を用い、入射／放射光パワー比を測定した。結果を図 15 に示す。ここで縦軸はバンドルファイバの透過率 X_t で、(5)式にて L_{ts} = 伝送損失 (L_t) と考えることにより次式で表わせる。

$$X_t = 10^{(L_i + L_t) / 10} \quad (19)$$

すなわち X_t は光源結合損失とバンドルファイバの伝送損失を含んだ値である。なお X_t を求める際の P_a の値は図 9、 S_i の値は被測定バンドルファイバの D_b より得た。また図 15 にて横軸は被測定ファイバの長さ（対数目盛）である。測定では被測定ファイバ自体の製造上のバラツキ、測定時のセッティング等による測定誤差がかなり大きく（約 10 % 程度）、光学ガラス系でのコア径の差は認められなかった。また石英系では端面反射損失が光学ガラス系より多

表1 プローブに採用した光ファイバ素線の仕様

	開口数 $N.A./\theta_{max}$	コア/クラッド径 D_{co}/D_{cr}	コア屈折率 n_1	クラッド屈折率 n_2
光学ガラス系	0.56 34°	16/18 μm 27/30 45/50	1.62	1.52
石英系	0.17 10°	100/125 700/800	1.452	1.352

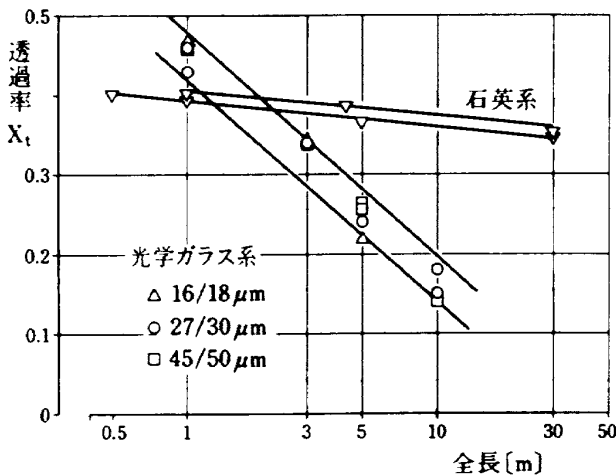


図15 バンドルファイバの透過率(測定用光源)

いため、全長が短い場合(1~2m)以下ではかえって X_t が小さいと言える。

4) 構造的性質

光ファイバの構造的性質として、引張り強度、曲げ強度(切断するまでの曲げ半径)は、実験的に求められており、いま光ファイバ素線のクラッド径を30 μm とした場合次のような値となる。⁶⁾

引張り強度 145 [kg/cm²], 225 [kg/cm²]

限界の半径 2 [mm], 10 [mm]

ただしバンドルファイバとした場合には、一般に保護螺旋管などに挿入して使用するため、引張り強度はかなり強くなり、逆に曲げ半径は大きくバンドル径1 ϕ のもので20~50mmである。次に耐熱性、化学的性質はそれぞれの製品により異なるが、光ファイバ素線はガラスであるため、それ自体では耐熱性、耐腐食性は良好である。耐熱性で問題となるのはバンドルファイバ外皮と、光ファイバ素線を束に固定する充填接着剤の性質である。特に検出端面の耐熱性は接着剤の溶出が生じる温度で決まり、一般の接

着剤では100~200℃、ガラスレジ系耐高温用のもので400℃とされている。

3.2 光ファイバプローブの特性

光ファイバプローブ(以下プローブと言う)の特性は、(13)式で示した全損失 L_T で評価される。ここで各損失を決定する要因は、図16に示すようにプローブ自体の特性、プローブと反射体との位置関係、反射体の特性に分けられる。図16で放射光パワー P_s 、反射光パワー P_r 、出力光パワー P_o をそれぞれ次のように記述した。

$$P_s = f_1(P_a, m, D_b, l_s, \chi) \quad (20)$$

$$P_r = f_2(P_s, a, x, d, \theta, \phi) \quad (21)$$

$$P_o = f_3(P_r, D_b, l_r, m, Q, \chi) \quad (22)$$

ここに m は、バンドルファイバにする時の送光側光ファイバ素線と受光側光ファイバ素線の本数比である。また光ファイバ素線の種類 χ は、次のようなパラメータで表わせるが、一般的には材質を決めると θ_{max} 、 D_{co} 、 D_{cr} を自由に選択することはできない。

$$\chi = f(\text{材質}, \theta_{max}, D_{co}, D_{cr}) \quad (23)$$

ここでは光学ガラス系光ファイバ素線を χ_g 、石英系光ファイバ素線を χ_s と記述することにする。次にバンドル方法(記号 Q で表わす)とは、送光側光ファイバ素線[S]と受光側光ファイバ素線[R]の、放射端における配置方法を言い、[S]と[R]をランダムに配置するランダム型(Q_R とする)、[S]を中心に集めて周囲に[R]を配置する同軸型(Q_C とする)、それぞれ半円状に配置する半円型(Q_H とする)がある(図17参照のこと)。また反射体の表面状態(記号 ϕ で表わす)は次のように考えるが、一般的に表現するために理想的な反射表面としての

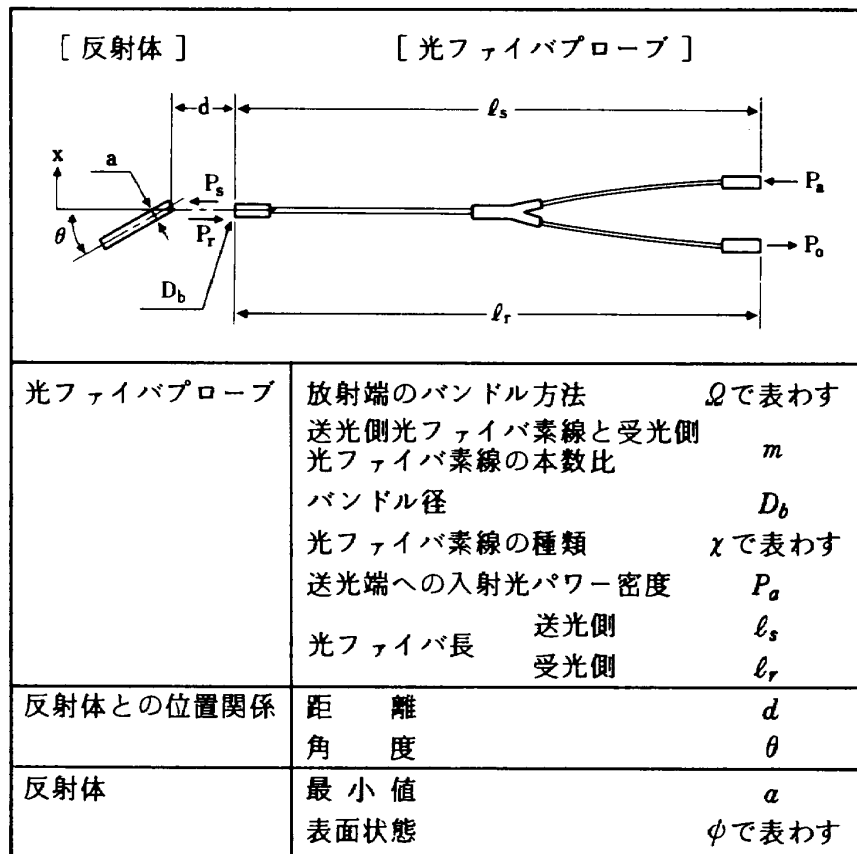


図 16 光ファイバプローブの特性の記述

鏡面との比較により，その特性を表わすことにする。

$$\phi = f(\text{表面の材質, 研磨状態, 色}) \quad (24)$$

以上述べたように，プローブの特性を決めるパラメータは多いが，まずプローブの \mathcal{Q} と出力特性の関係について計算で求める。

1) 計算によるプローブの出力特性の推定

プローブの出力特性を，(20)～(22)式にて $P_s = 1$ ， $\ell_r = 0$ とした場合の P_o/P_s により推定する。

$$P_o/P_s = f_3(P_r, D_b, m, \mathcal{Q}, \chi)$$

$$P_o = f_3(a, x, d, \theta, \phi, D_b, m, \mathcal{Q}, \chi) \quad (25)$$

P_o の計算は，プローブの放射端面上で送光側光ファイバ素線[S]から放射した光が，反射体で反射して受光側光ファイバ素線[R]で集光する光量(送光/受光間授受光量とする)を，プローブを形成する全部の[S]，[R]について計算して求める。従ってこの計算に必要な基礎データとして，1本の[S]からの放射光量 I_o に対し，1本の[R]が集光する光量 I_c を求める必要がある。これは反射体を理想反射面とすれば，図18に示すように[S]と[R]を対向させて， I_o に対する I_c を測定して求められ

○ 送光側光ファイバ素線 [S]

● 受光側光ファイバ素線 [R]



図 17 バンドル方法の種類

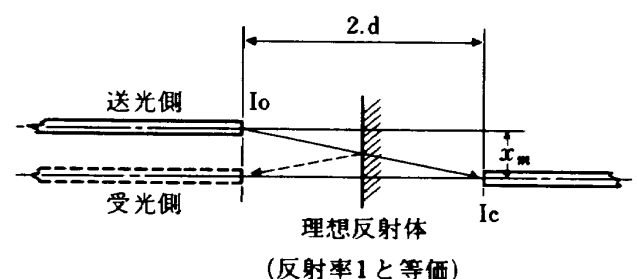


図 18 送光/受光間授受光量の測定

る。ここで I_c は次式のように表わせる。

$$I_c = f(I_o, d, x_m, \chi) \quad (26)$$

ここに x_m は平行な2本の[S]と[R]の中心間距離である。ここでは χ_g と χ_s のバンドルファイバ($D_b = 1\phi$)により測定を行なった。測定結果を図19

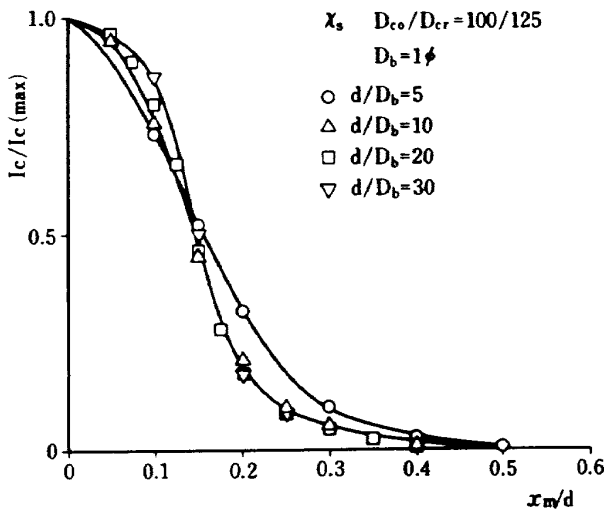


図 19 送光/受光間の授受光量の測定結果

(χ_s の測定例) に示す。図で横軸は x_m/d 、縦軸は I_c の最大値 ($I_{c(max)}$) と I_c の比である。この結果より I_c はほぼガウシアンとして次のように近似することができる。

$$I_c(x_m/d) = \frac{K}{\sigma} \text{EXP} \left[- \left(\frac{x_m^2}{d^2} / 2\sigma^2 \right) \right] \quad (27)$$

ここに K 及び σ^2 は測定結果より d の関数として求めることができる。以上は $[S]$ と $[R]$ の授受光量の計算手順である。次にプローブとしての P_o の計算は、まず $[S]$ と $[R]$ を仮定したバンドル方法に応じて一定の D_b 内に配置し、この配置図より x_m を求める。いま $[S]$ の本数を m_s 、 $[R]$ の本数を m_r 、 i 番目の $[S]$ と j 番目の $[R]$ ($1 \leq i \leq m_s$, $1 \leq j \leq m_r$) の距離を $x_m(i, j)$ と書けば、 P_o は次式で表わせる。

$$P_o = \sum_{i=1}^{m_s} \sum_{j=1}^{m_r} I_c(x_m(i, j)) \quad (28)$$

以上の計算手順を図 20 に示す。ここで計算は、 $D_b = 1\phi$ 、 $a = \infty$ 、 $x = 0$ 、 $\theta = 0^\circ$ の場合について行なった。また ϕ は上述したように理想的反射面とした。なお m_s 、 m_r の値は、充填率を 3-1(2) より 60% (χ_s)、70% (χ_g) と仮定し、それぞれ $m_s + m_r$ の値として 42 本、194 本とした。以上より求めた結果を図 21 (χ_s)、図 22 (χ_g) に示す。図で横軸には d/D_b を、縦軸には P_o をとった。これより χ_s と χ_g の差は P_o の最大値を示す d/D_b の位置の違いに表われており、 χ_g ではこの位置が d/D_b の小さいところであり、 χ_s ではこれより大きい位置に P_o の最大値が

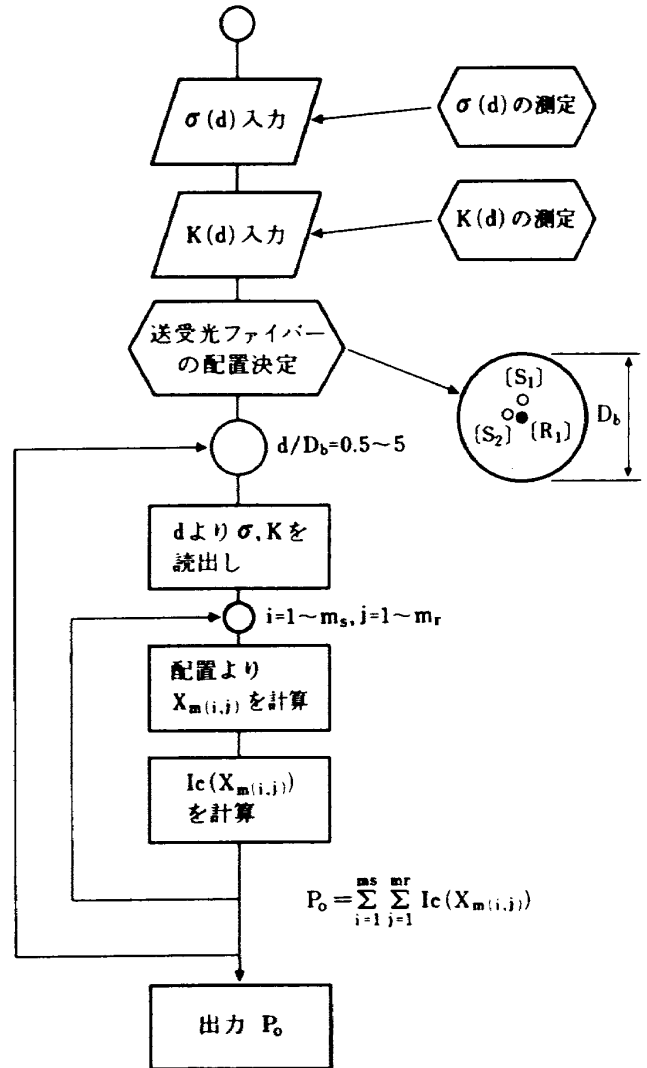


図 20 出力特性の計算流れ図

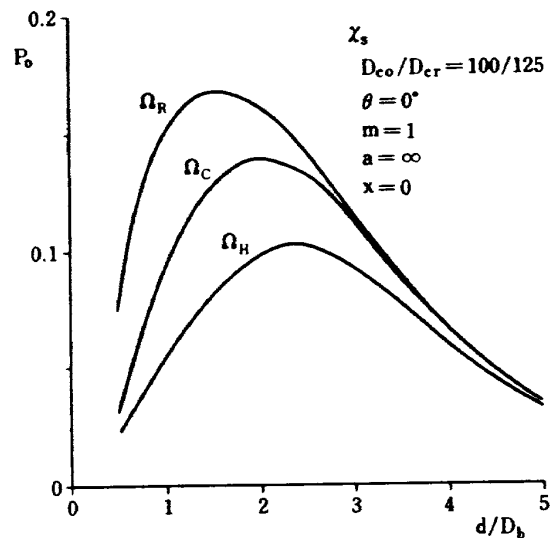


図 21 出力特性の計算結果(1)

ある。これは光ファイバ素線の θ_{max} の違いによるもので、次のように考えることができる。いま図 23 に示すように $[S]$ と $[R]$ を並べた場合、 $[R]$ が集光する光量値 I_c は放射光範囲に対する有効反射範

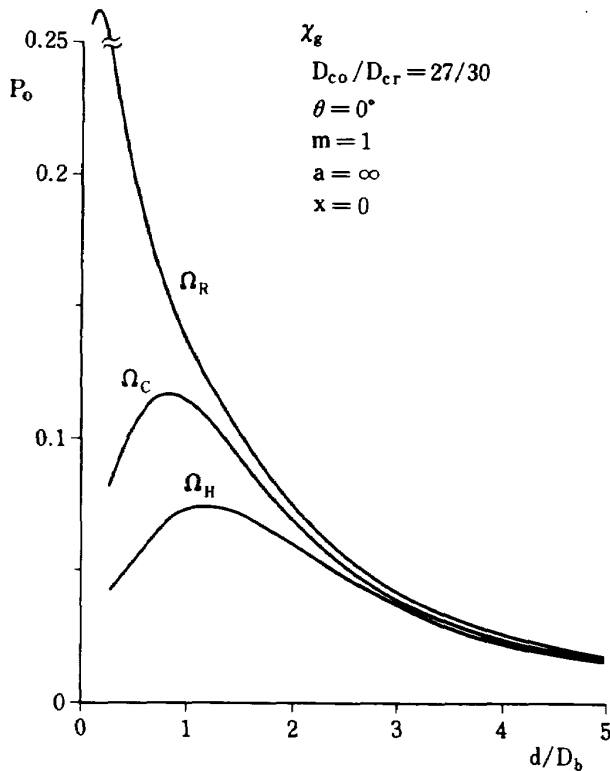


図 22 出力特性の計算結果(2)

囲の比で近似的に表わせるが、 θ_{max} が大きいほど比の値が最大になるときの d/D_b は小さくなる。従って θ_{max} が大きく、放射光の拡がり大きい χ_g と、 θ_{max} が小さい χ_s とは、上述した差が生じると言える。

次にバンドル方法 Ω_R , Ω_C , Ω_H の差は、 $d/D_b \leq 3.5 (\chi_s)$, $d/D_b \leq 2 (\chi_g)$ で顕著であり、 P_o の値は Ω_H , Ω_C , Ω_R の順に大きくなっている。これは反射体とプローブが近接するにつれて、反射光が [S] の周囲の狭い範囲に限定されてくるが、 Ω_H , Ω_C では [S] と [R] がそれぞれの集合として離れているため、 P_o は図 22 からわかるように $d/D_b \rightarrow 0$ に従い減少する。 Ω_R では [S] と [R] が混在しているためにこの影響は少なく、特に χ_g では $D_{cr} = 30 \mu\text{m}$ と小さいため d/D_b が 0 に近づくにつれて (0.25 以下) P_o は増加し、最大値を生じてから急激に減少する。また P_o の定量的な評価としては、反射体が理想的反射面であるとしたにもかかわらず、0.05 ~ 0.17 程度 ($d/D_b = 1 \sim 1.5$) とかなり小さい。このことは実際の反射体のように反射率の低い場合には、非常に大きな反射損失を生じると言える。次に [S] と [R] の本数比 m の変化に対する P_o の値を計算した。これは $D_b = 1\phi$ の内に配置できる [S] と [R] を、 Ω_R , Ω_C について $m = 0.2 \sim 2$ となるように設定して

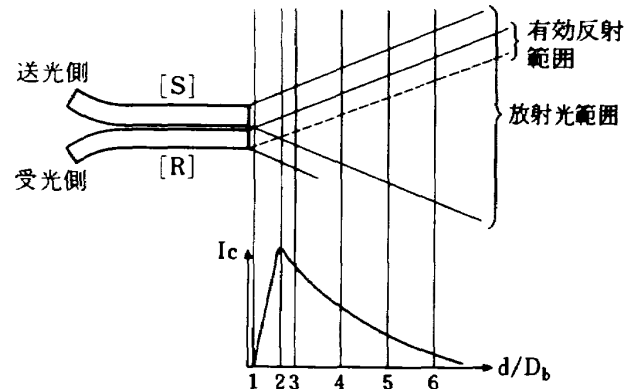
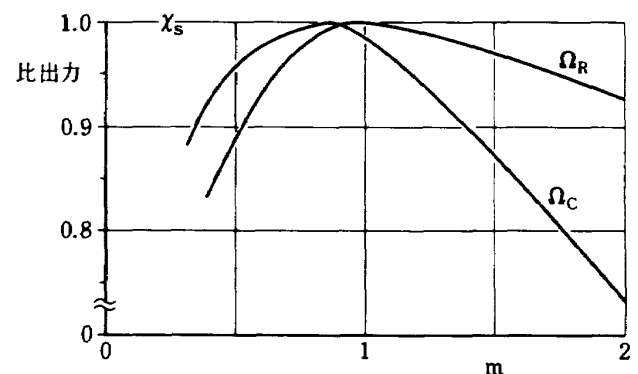
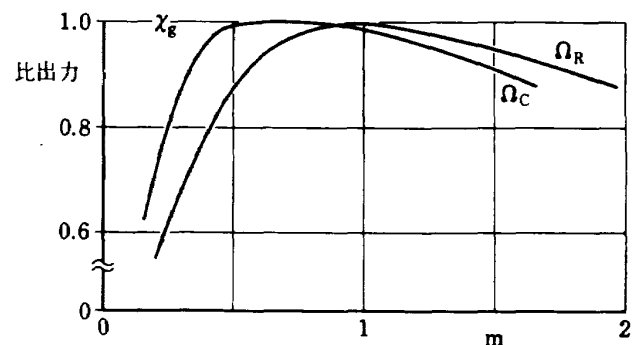


図 23 出力特性の説明

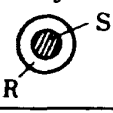

図 24 - (1) m に対する出力値の変化 (χ_s)図 24 - (2) m に対する出力値の変化 (χ_g)

P_o を計算したもので、結果を図 24 (1) (χ_s), 図 24 (2) (χ_g) に示す。図で縦軸はそれぞれの計算値の内最大値を 1 とした比出力である。これによれば、 χ_s では Ω_C , Ω_R とも $m = 0.9 \sim 1$, χ_g では $m = 0.5 \sim 1 (\Omega_C)$, $m = 0.9 \sim 1 (\Omega_R)$ で最大値を得る。以上よりプローブの製作にあたっては、 $m = 1$ を目標にすれば製作上のバラツキを含めて充分であると言える。

2) 試作プローブの出力特性の測定

プローブの出力特性を求めるため、表 2 に示す各種の特性測定用プローブを試作した。各プローブの識別は表に示すように [Ω , $D_{cr} - D_b$] で表わす。ま

表 2 試作したプローブの仕様

バンドル方法	D_b	送光側 [S]		受光側 [R]		識別記号
		材質	D_{co}/D_{cr} μm	材質	D_{co}/D_{cr} μm	
\mathcal{Q}_c 	1 ϕ	GA	16/18	GA	16/18	C 18 - 1 ϕ
	1.5 ϕ	SI	100/125	SI	100/125	C 125 - 1.5 ϕ
	1.5 ϕ	SI	600/800	GA	27/30	C 800/30-1.5 ϕ
\mathcal{Q}_R 	1 ϕ	GA	16/18	GA	16/18	R 18 - 1 ϕ
	1 ϕ	GA	27/30	GA	27/30	R 30 - 1 ϕ
	2 ϕ	GA	27/30	GA	27/30	R 30 - 2 ϕ
	1 ϕ	SI	100/125	SI	100/125	R 125 - 1 ϕ
	2 ϕ	SI	100/125	GA	27/30	R 125/30-2 ϕ

注: GA; 光学ガラス系 SI; 石英系 長さは ℓ_r , ℓ_s とも 1[m]

た後述するように 2 種類の光ファイバを用いたプローブは, $[\mathcal{Q}, D_{cr1}/D_{cr2} - D_b]$ と書き, D_{cr1} は送光側を, D_{cr2} は受光側を示す。特性測定に用いる反射体には, 図 25 に示す形状のものを用いた。これは一般炭素鋼の表面に, 機械工作上の上仕上げに相当する研磨を施したもので, ここでは ϕ_f と表記する。

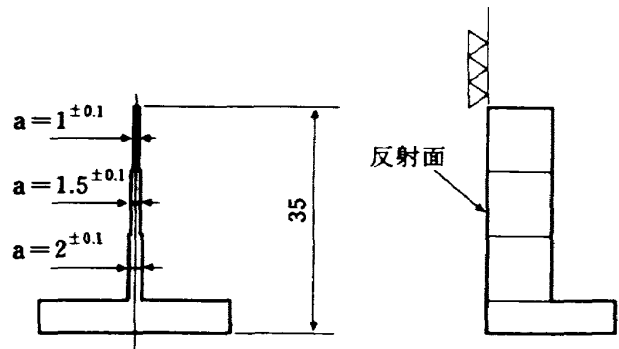
以上述べた反射体と測定用光源 (付録 (1) 参照) を用いて, 表 2 の各プローブの出力特性を測定した。ここで測定値は 1) と同様に P_o/P_s とすると, (21) 式にて $x=0$, $\phi=\phi_f$, (22) 式にて $\ell_r=1\text{m}$, $m=1$ より

$$P_o/P_s = f_3(P_r, D_b, \mathcal{Q}, \chi) \\ = f_3(a, d, \theta, D_b, \mathcal{Q}, \chi), \quad (29)$$

となる。これはまた (9) 式で示した反射透過率 X_{rt} ($\ell_r=1\text{m}$) に等しい。

測定結果を図 26-(1), (2), (3), 図 27-(1), (2), (3) に示す。図 26 は (29) 式にて $a/D_b=1$, $\theta=0^\circ$ の測定条件のもとに, 反射体とプローブとの距離 $d/D_b=0.5 \sim 5$ での X_{rt} を求めた結果である。図 26-(1) は, χ_g, \mathcal{Q}_R (記号 \circ), χ_s, \mathcal{Q}_R (Δ), χ_g, \mathcal{Q}_c (\square), χ_s, \mathcal{Q}_c (∇) の比較である。ここで図 21, 図 22 の計算結果とは ℓ_r , a , ϕ の条件が異なるが, ほぼ同様な傾向であることがわかる。図 26-(2) は \mathcal{Q}_c での χ_g (\circ), χ_s (Δ), χ_{sg} (\square) の比較で, χ_{sg} とは中心の送光側に $D_{cr}=800\mu\text{m}$ の単芯の χ_s を用い, 周囲の受光側に χ_g を用いたプローブ (混在型プローブとする) を示す。図 26-(3) は \mathcal{Q}_R での χ_g (\circ), χ_s (Δ), χ_{sg} (\square) の比較で, χ_{sg} は送光側

に $D_{cr}=125\mu\text{m}$ の χ_s を, 受光側に χ_g を用いて両者をランダムに配置したプローブである。これ等の結



(単位は mm)

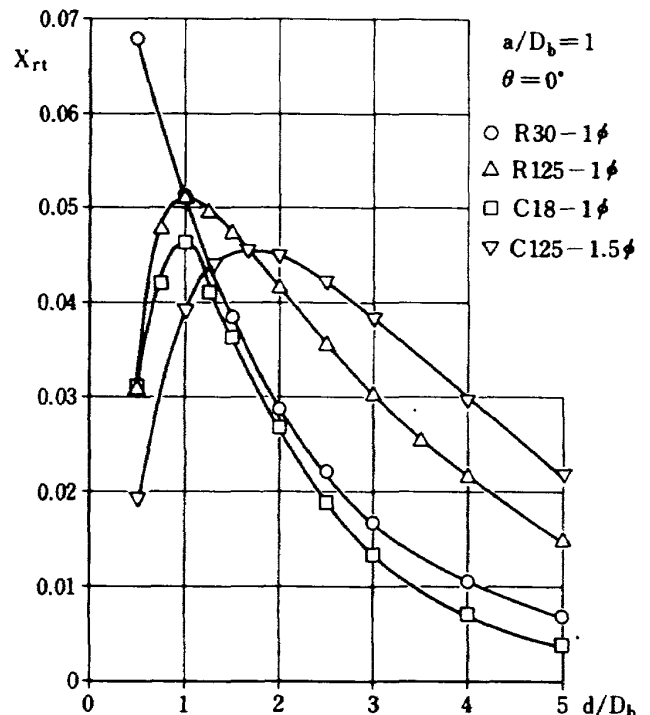
 図 25 特性測定用反射体 (ϕ_f)


図 26-(1) 試作プローブの出力特性(1)

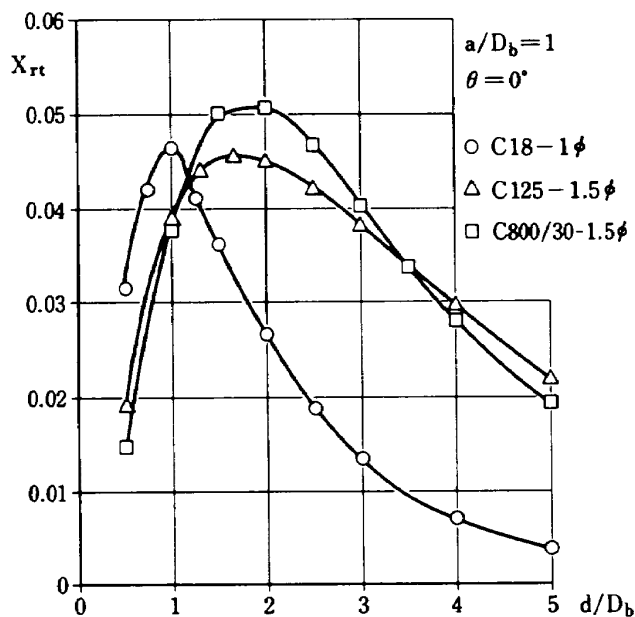


図 26 -(2) 試作プローブの出力特性(2)

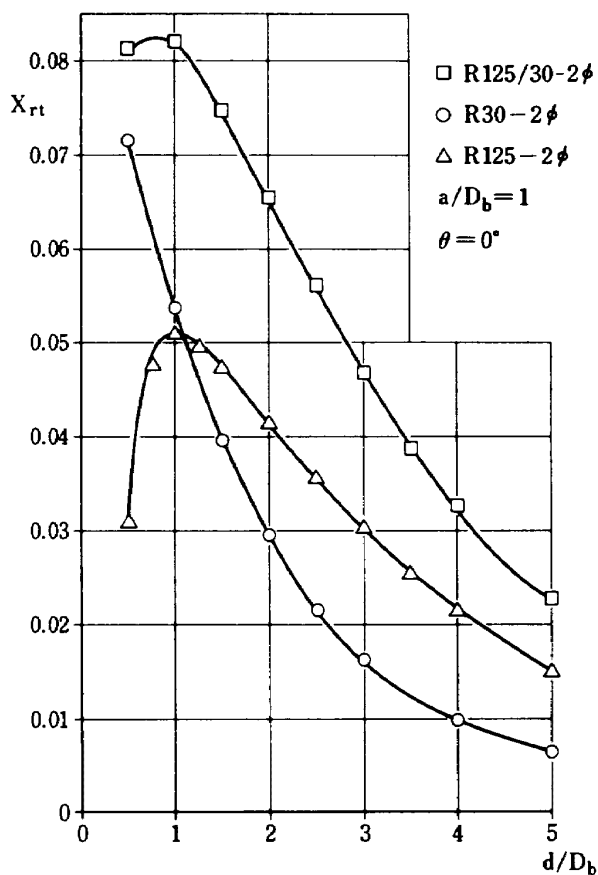
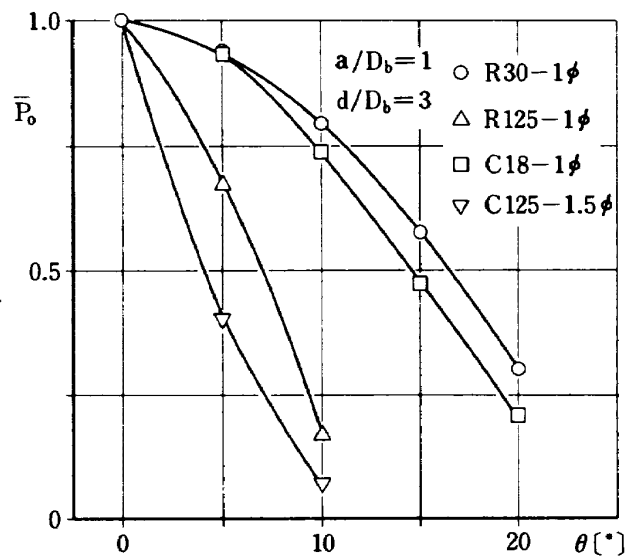
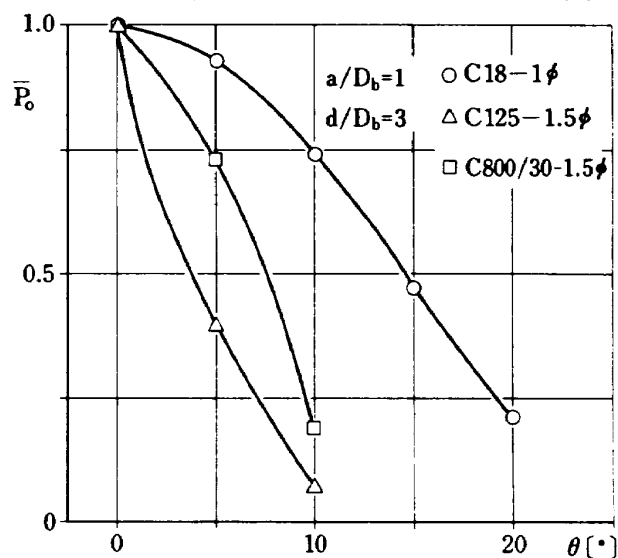
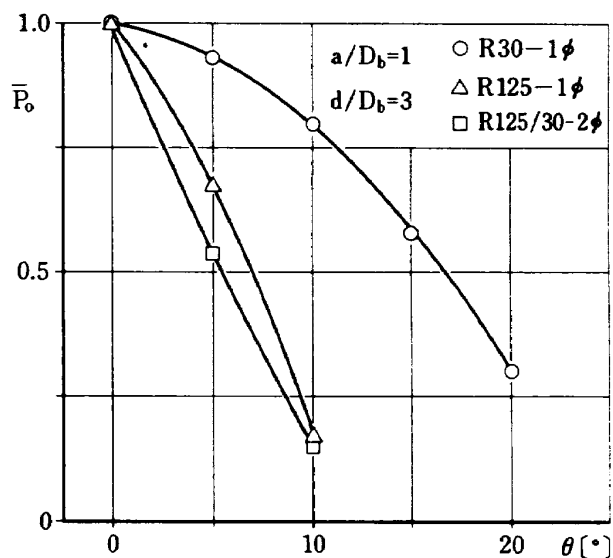


図 26 -(3) 試作プローブの出力特性(3)

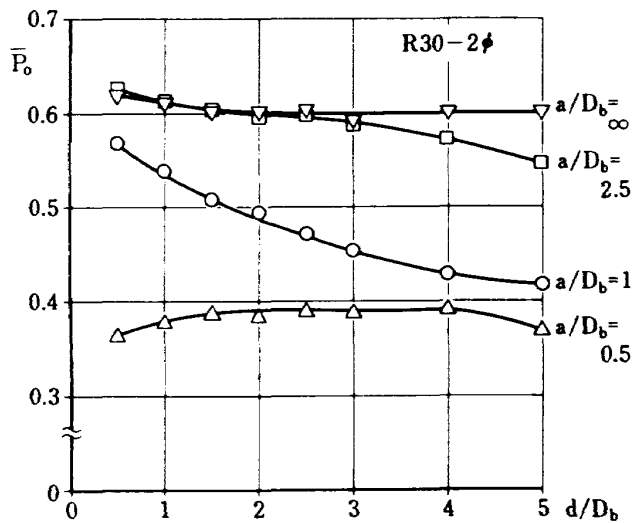
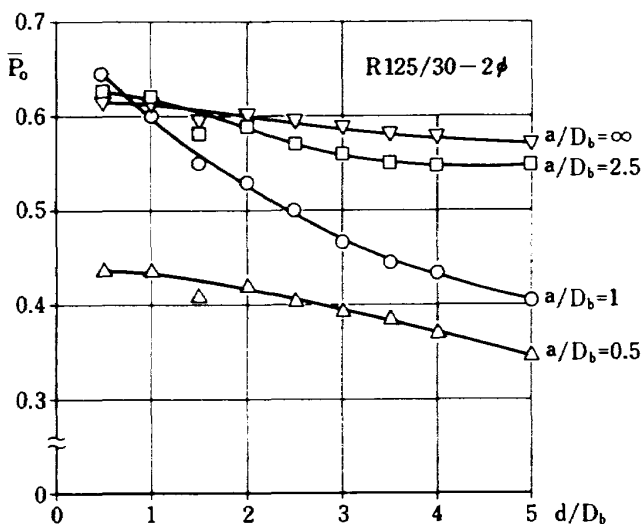
果より特に Q_R の混在型プローブ($R125/30-2\phi$)が良い出力特性を示しているが、これは θ_{max} が小さい χ_s からの放射光束が集中して反射体に当り、一方 θ_{max} の大きい χ_g で反射光を広い角度にわたり集光している理由によるものである*。

図 27 -(1) θ に対する出力低減特性 (1)図 27 -(2) θ に対する出力低減特性 (2)図 27 -(3) θ に対する出力低減特性 (3)

次に図 27 は (29) 式にて、 $a/D_b=1$ 、 $d/D_b=3$ の測定条件のもとに、 $\theta=0 \sim 20^\circ$ と変化する場合の出力の低減特性を求めた結果で、図で縦軸には θ

$= 0^\circ$ での出力値を1とした比出力 \bar{P}_0 をとった。図27-(1)は χ_g, \mathcal{Q}_R (記号○), $\chi_s, \mathcal{Q}_R(\Delta)$, $\chi_g, \mathcal{Q}_C(\square)$, $\chi_s, \mathcal{Q}_C(\nabla)$ の比較である。これより \mathcal{Q} の違いに対する出力低減の傾向はあまり変わらず, χ の違いに対してはその影響が大きいことがわかる。図27-(2), (3)はそれぞれ $\mathcal{Q}_C, \mathcal{Q}_R$ での $\chi_g(\circ)$, $\chi_s(\Delta)$, $\chi_{sg}(\square)$ を比較したもので, χ_s に対して χ_s, χ_{sg} は同様に θ の変化に対し出力低減が著しいことがわかる。

以上の出力特性は反射体の幅を $a/D_b = 1$ とした場合であるが, a/D_b を変えた場合の出力特性の変化をR30-2 ϕ とR125/30-2 ϕ のプロープで測定した。結果を図28-(1), (2)に示す。図で縦軸は反射体を平面反射鏡($\phi = \phi_m$ とする。 $a/D_b = \infty$)とした時の出力値を1とした比出力 \bar{P}_0 をとった。結果より $a/D_b = 2.5$ ではほぼ $a/D_b = \infty$ と同程度の出力値を


 図28-(1) a/D_b の変化に対する出力特性(1)

 図28-(2) a/D_b の変化に対する出力特性(2)

得られるが, $a/D_b = 1$ ではかなり出力が小さく, d/D_b の影響が顕著である。これは d/D_b が増加するに従い, 放射光束が反射体に投影する面積が増えるが, a が狭い場合には放射光束の一部は反射せずに失われ, 反射に有効な部分が少ないためと考えられる。また $a/D_b = 0.5$ では, もともと反射体幅が狭すぎるため, この程度の d/D_b の変化範囲では反射せずに失われる放射光の変化は小さい。従って \bar{P}_0 の変化は小さく, \bar{P}_0 の絶対値は当然他の場合よりも小さい。図28-(1)と(2)の比較では, 図26での χ_g と χ_{sg} の比較と同様に, χ_{sg} の方が反射光が集中して反射体に当たるため, 特に $a/D_b = 1, 0.5$ にて出力が大きくなる。

次に反射体表面の影響を調べるため, 3種類の反射体を製作した。これは一般炭素鋼表面を上仕上げ(記号 $\Delta\Delta\Delta$), 並仕上げ($\Delta\Delta$), 荒仕上げ(Δ)にそれぞれ研磨したもので, $a/D_b = \infty$ である。測定はR30-1 ϕ (記号○), R125-1 ϕ (Δ), R125/30-2 ϕ (\square)の各プロープを用いて行なった。結

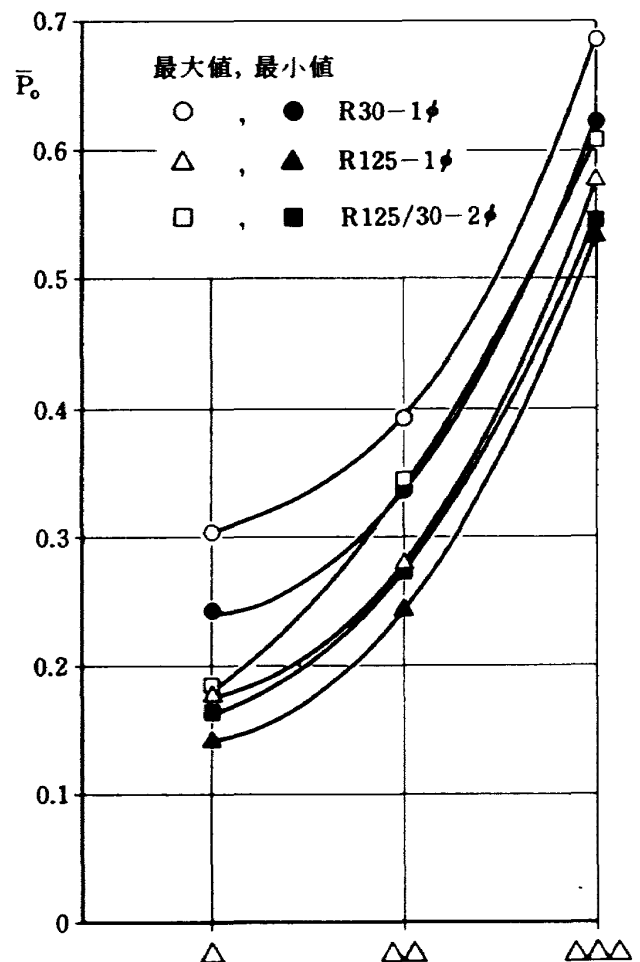


図29 反射面の差違に対する出力特性

果を図 29 に示す。図で縦軸には図 28 と同様に $\phi = \phi_m$, $a/D_b = \infty$ での出力値を 1 とした比出力 \bar{P}_0 をとった。各測定値は反射表面を数点にわたって測定した最大値 (○, △, □) と最小値 (●, ▲, ■) である。これより反射表面の荒さが増すに従って, 出力値は著しく減少することがわかる。

3) 試作プローブの出力波形

プローブの出力波形は (15) 式, 図 7 に示したように反射体がプローブの端を横ぎる点から立上り始め, プローブのバンドル径 D_b にかけて移動する間, 出力値が増加する波形となる。ここでは試作したプ

ローブについて波形を測定した。図 30 において反射体は, 回転中心点を軸に角度 θ だけ傾け, また x 方向に微動が可能である。反射体には図 24 のもの

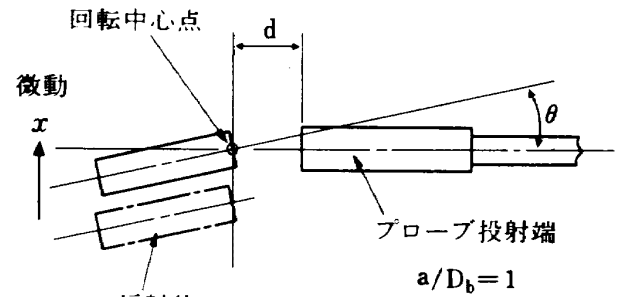


図 30 出力波形の測定方法

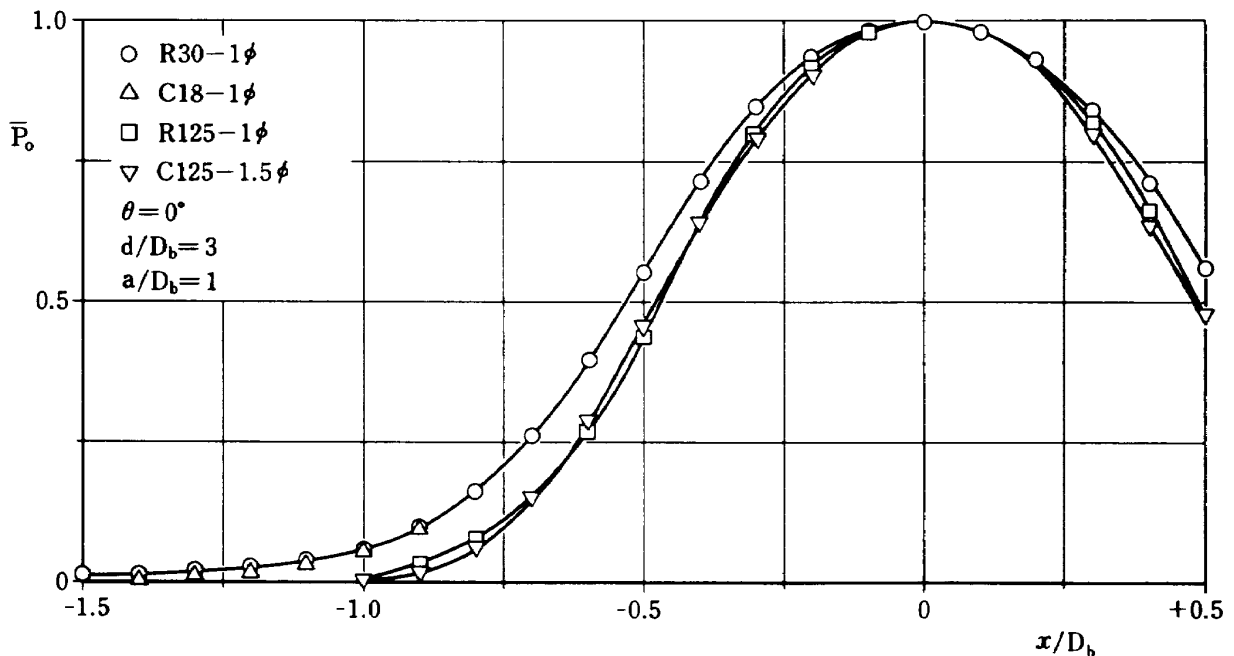


図 31 - (1) 出力波形 (1)

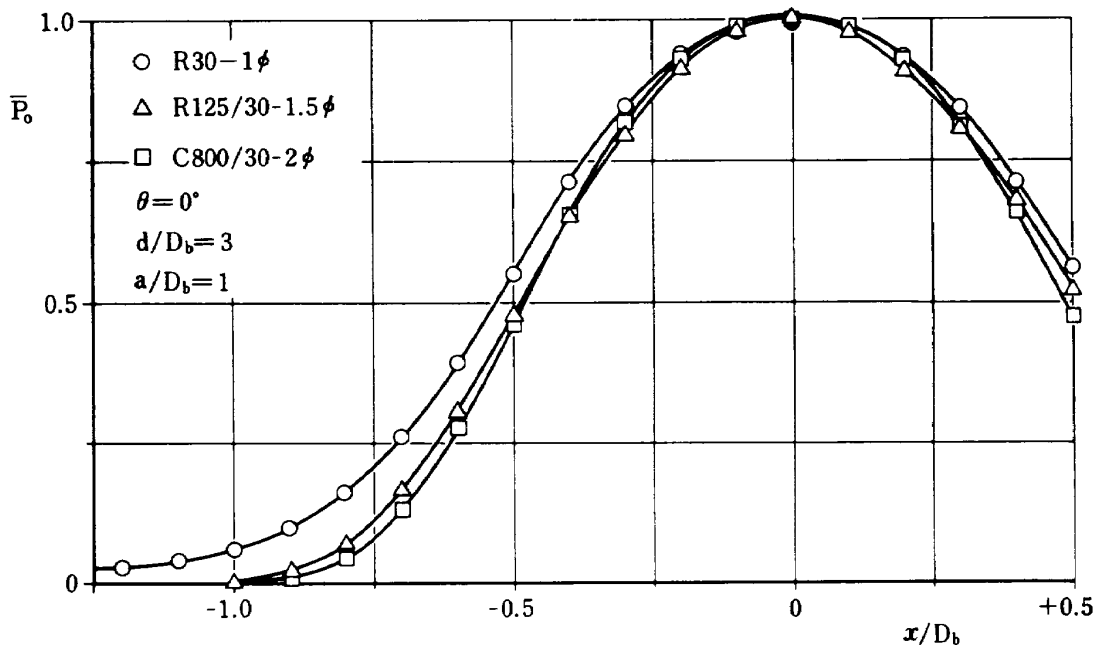
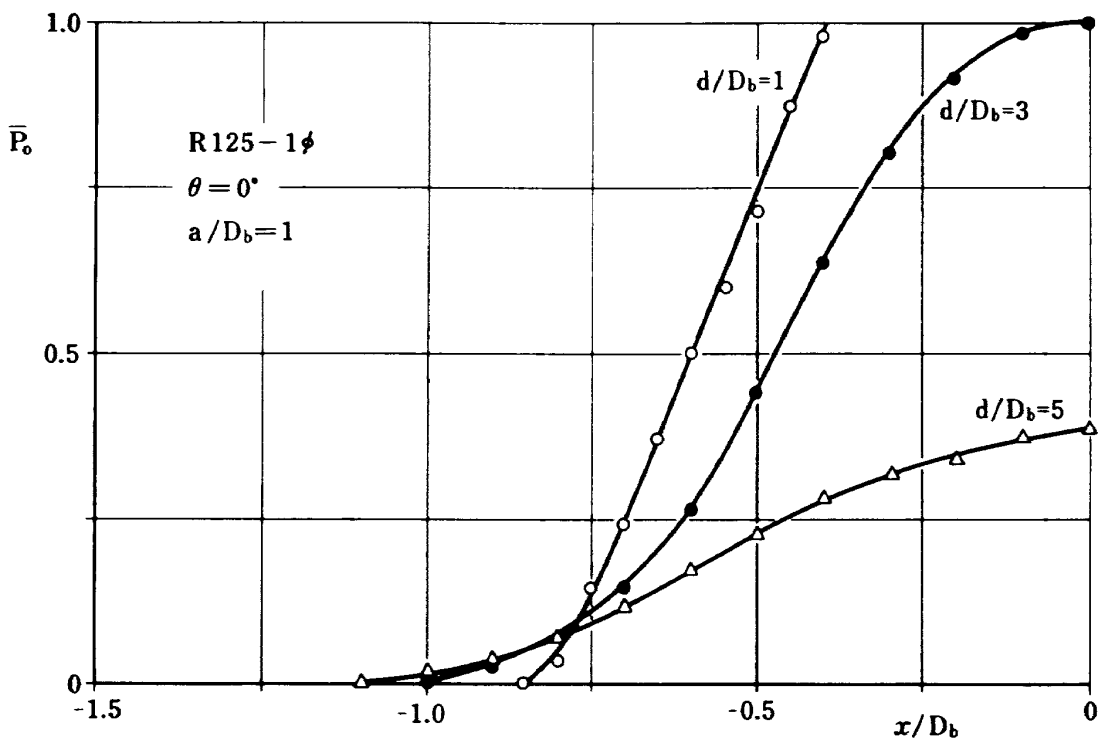
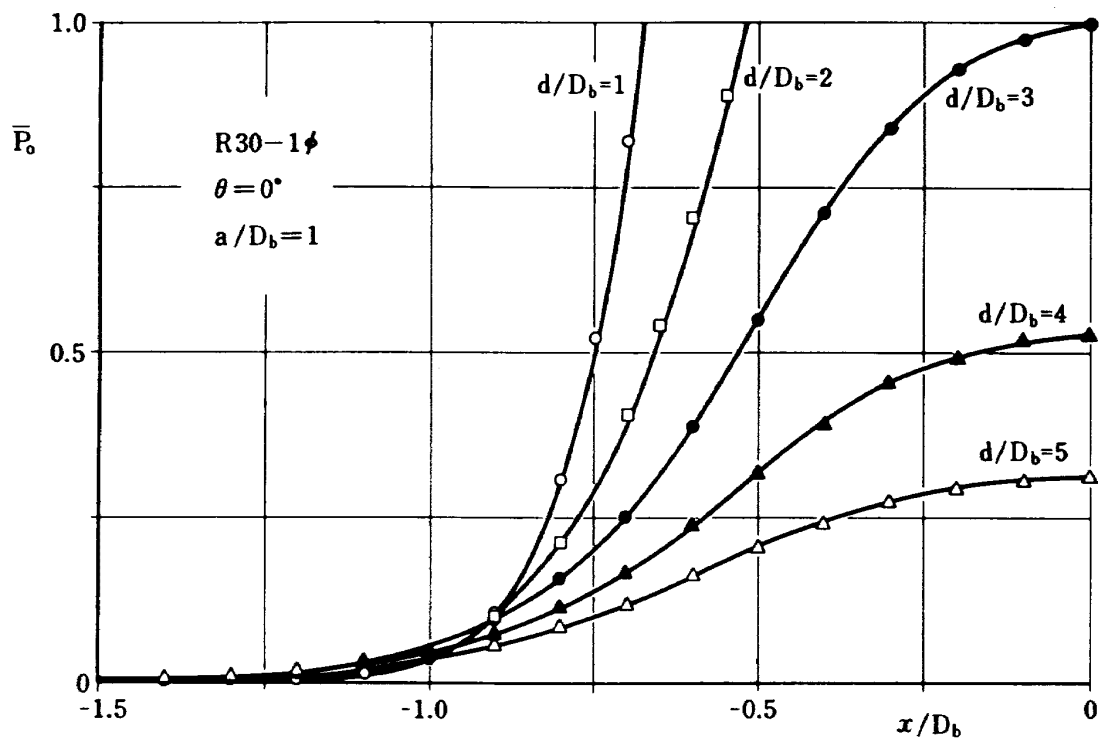


図 31 - (2) 出力波形 (2)

を用い、 $a/D_b = 1$ とした。測定ではプローブの中心と反射体中心が一致する点($x/D_b = 0$)よりプローブを移動して、 x/D_b に対する出力値を求めた。結果を図31～図33に示す。図31-(1)、(2)は $d/D_b = 3$ 、 $\theta = 0^\circ$ としたときの χ 、 \mathcal{Q} の影響を求めたもので、図で縦軸には出力最大値を1とした比出力 \bar{P}_0 、横軸には x/D_b をとった。ここで x/D_b の負値は反射体中心がプローブ中心より前方(通過前)

にあることを示している。図31-(1)では、 χ_g 、 \mathcal{Q}_R (記号○)と χ_g 、 \mathcal{Q}_C (△)及び χ_s 、 \mathcal{Q}_R (□)と χ_s 、 \mathcal{Q}_C (▽)がそれぞれ同様な出力波形を示し、図31-(2)より混在型プローブは両者とも χ_s 、 \mathcal{Q}_C と同様な出力波形である。これより出力波形の違いは、 \mathcal{Q} の違いよりも χ の種類の差、特に放射側の χ により決まり、 χ_g では波形は緩慢で、 χ_s 、 χ_{sg} では比較的急峻に立ち上る。


 図32-(1) 出力波形(a/D_b の変化)

次に d が変動する場合の各プローブの出力波形を図 32-(1), (2), (3) に示す。ここで測定条件は $a/D_b = 1$, $\theta = 0^\circ$ である。図で縦軸には $d/D_b = 3$ での最大値を 1 とする比出力 \bar{P}_o をとった。これより、各プローブとも $x/D_b = -1$ の位置付近 (反射体がプローブを横ぎり始める位置) での立ち上がり部分は重なる傾向にあり、この点にスレッシュホール

ドレベルを設定すれば、 d の変動に対する影響を少なくすることができることがわかる。

次に θ の変動に対する各プローブの出力波形の変化を図 33-(1)~(6) に示す。測定条件は $d/D_b = 3$, $a/D_b = 1$ で、 $-1.4 \leq x/D_b < 1$ の範囲とした。ここで反射体は移動方向に対し手前側に傾いている状態で測定した。従って x/D_b が正值である範

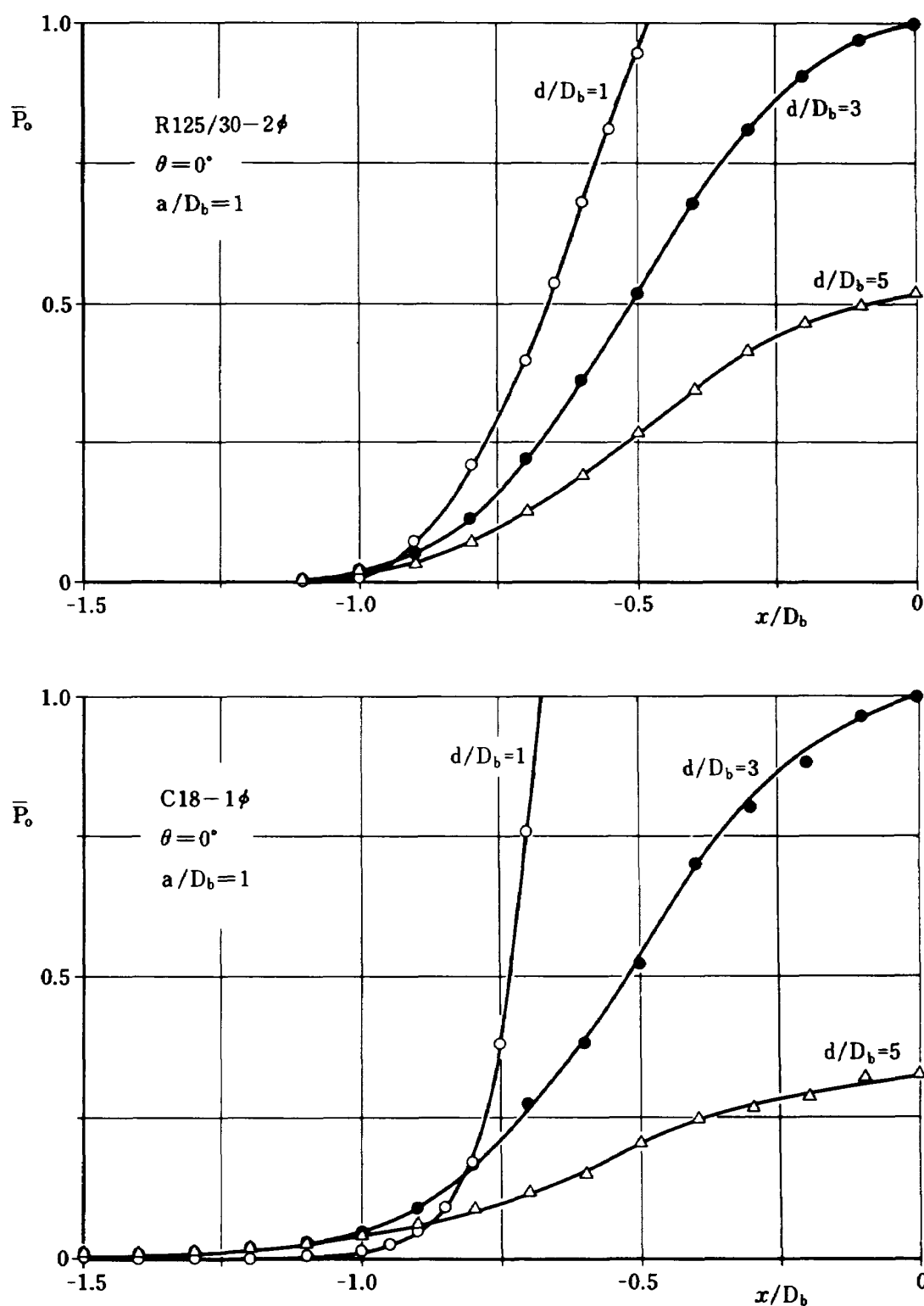
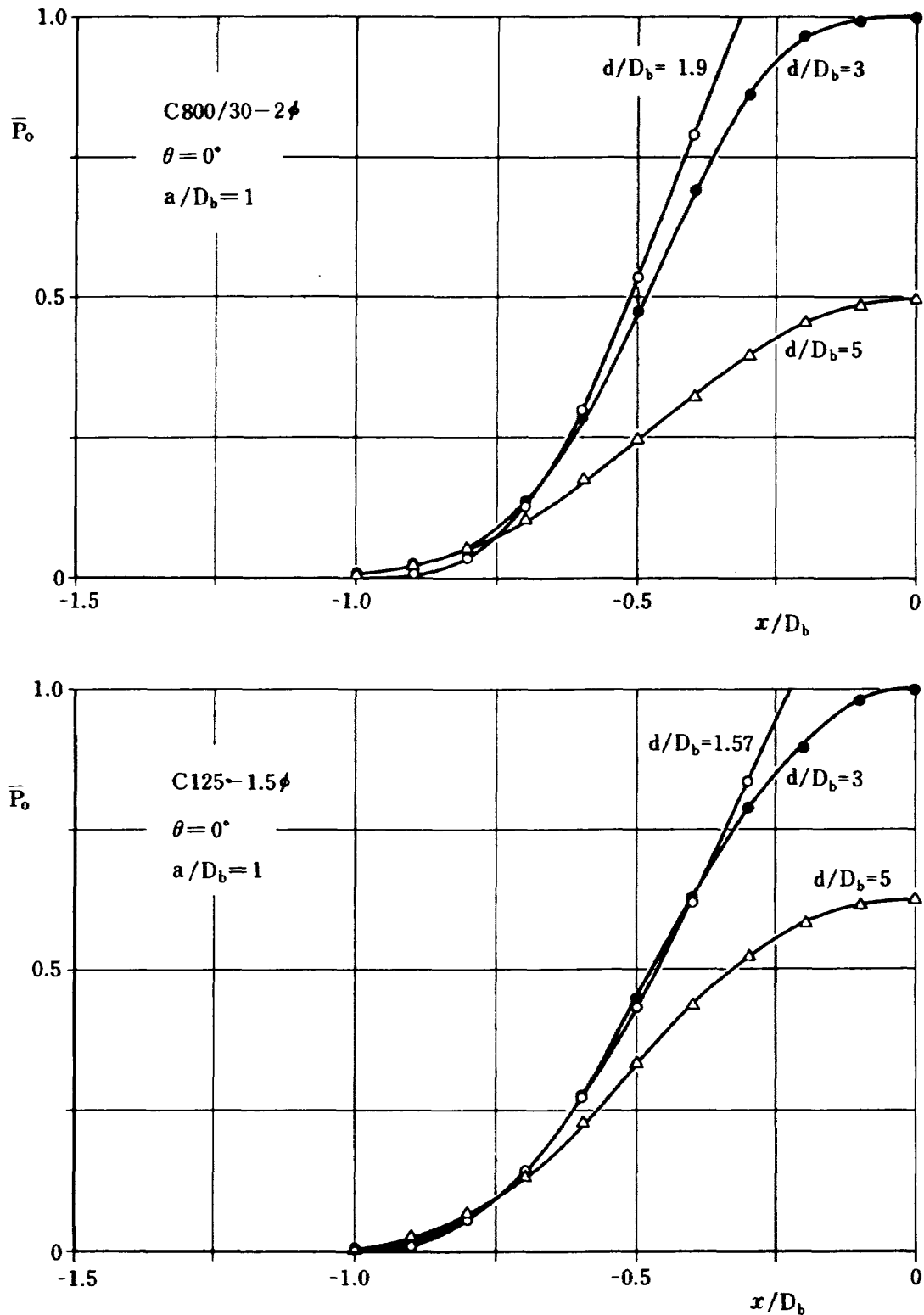
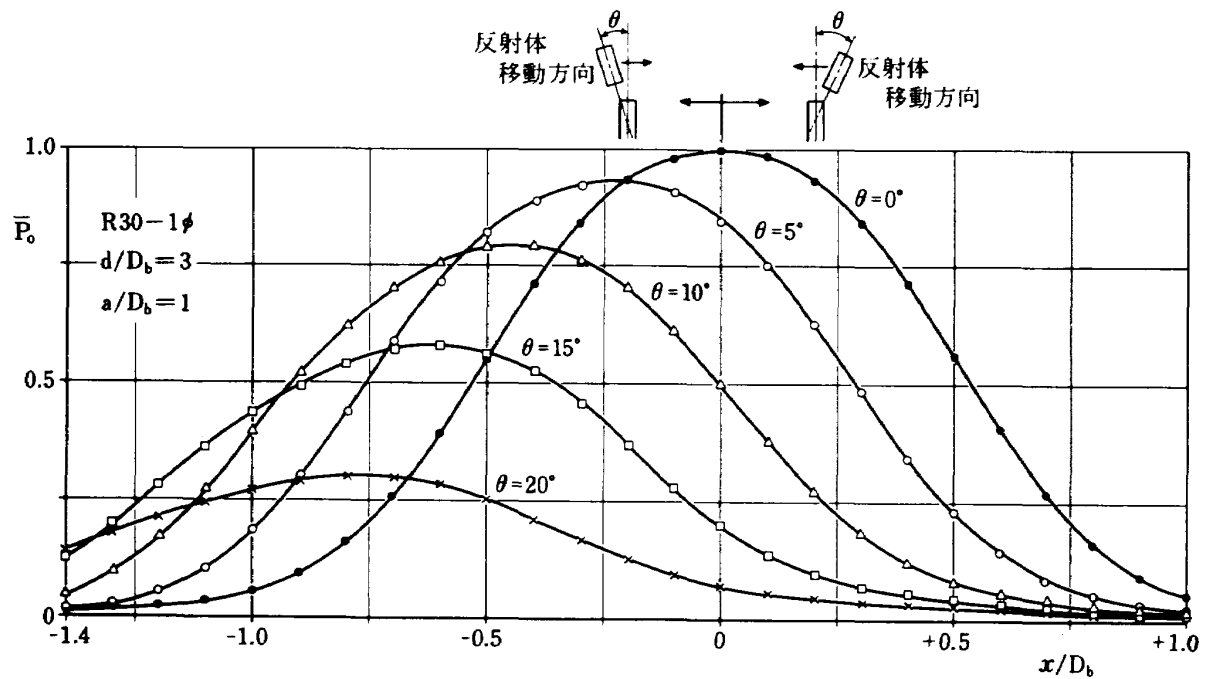
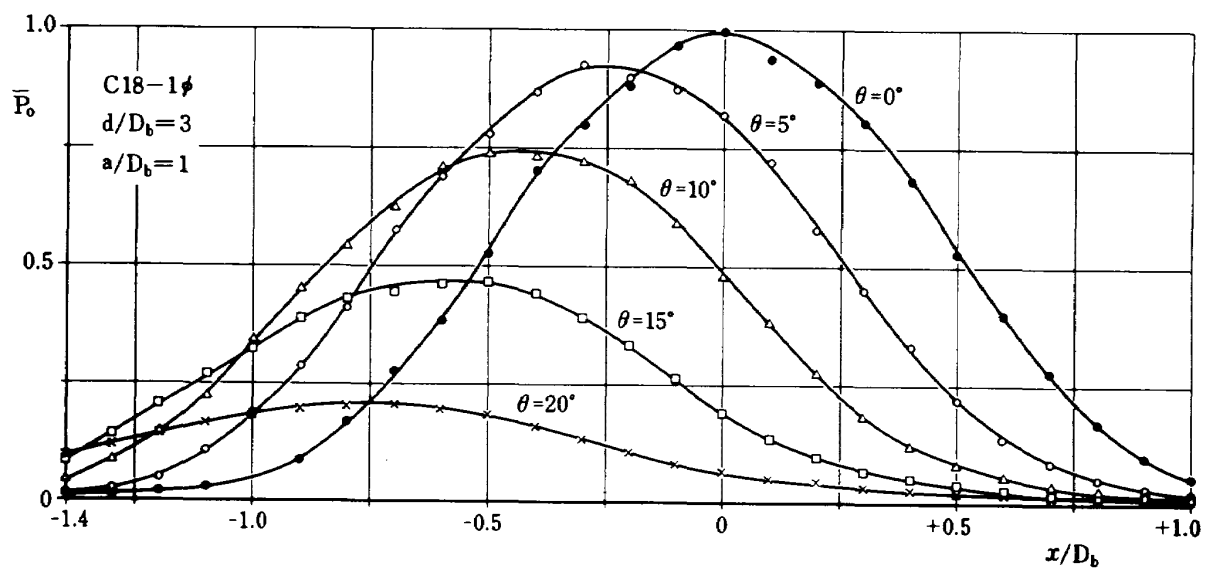
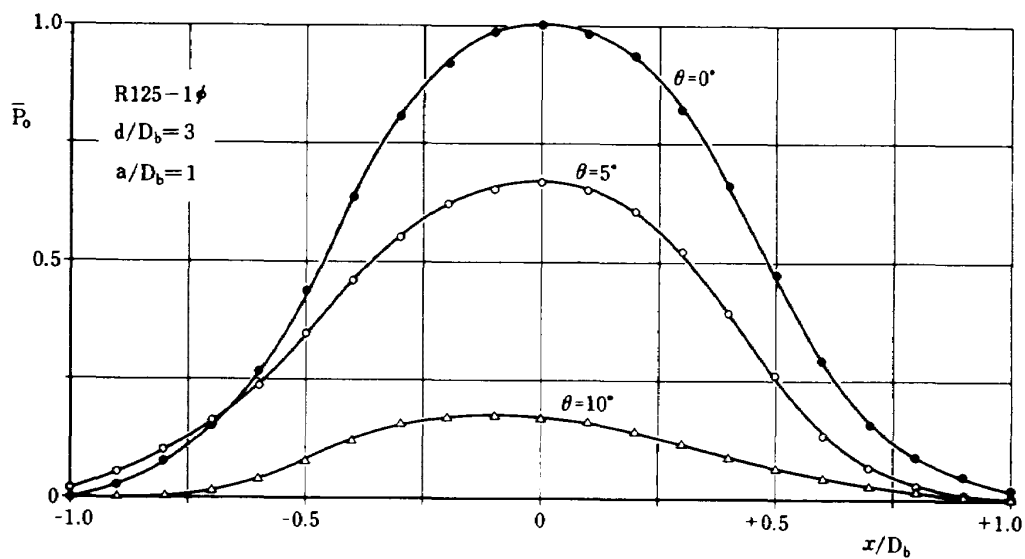


図 32-(2) 出力波形 (a/D_b の変化)

囲で求めた波形は、反射体が逆の傾きを持って $x/D_b = 1 \rightarrow 0$ と移動する場合の出力波形と同等と考えられる(図 33-(1) 参照)。図において縦軸は $\theta = 0^\circ$ での出力最大値を 1 とした比出力をとった。これより χ_g のプローブ(図 33-(1), (2))では、 θ の変動に対し非常に大きな出力波形の変化を生じる

が、 χ_s (図 33-(3), (4))、 χ_{sg} (図 33-(5), (6)) のプローブでは θ の変動による影響は、単純に出力が減少する傾向である。以上の結果より θ の変動に対しては $\theta \geq 15^\circ$ で、出力波形の立ち上りの点が移動するか、又は出力値そのものが小さくなる為、測定誤差が大きくなることが考えられる。


 図 32 - (3) 出力波形 (a/D_b の変化)

図 33 - (1) 出力波形 (θ の変化)図 33 - (2) 出力波形 (θ の変化)図 33 - (3) 出力波形 (θ の変化)

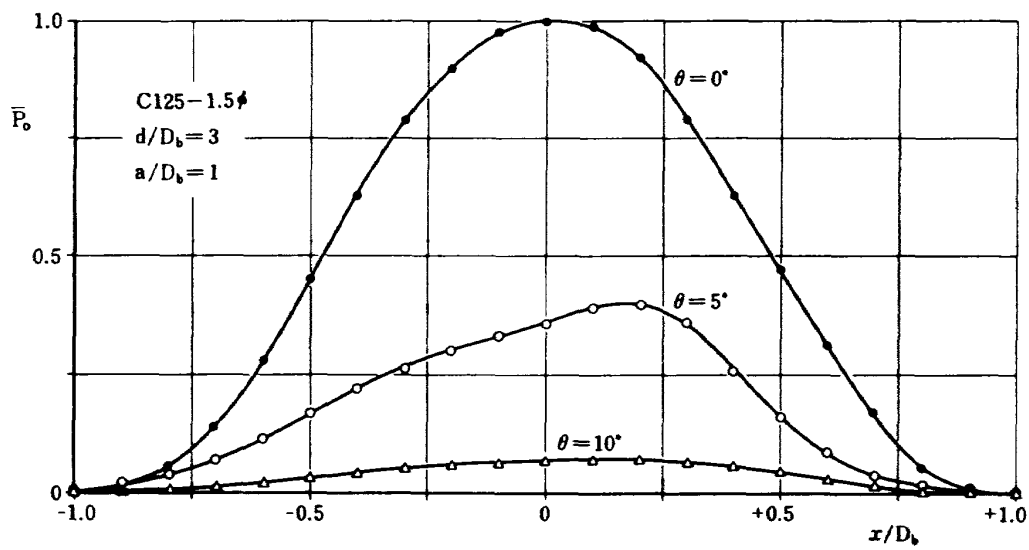


図 33 - (4) 出力波形 (θ の変化)

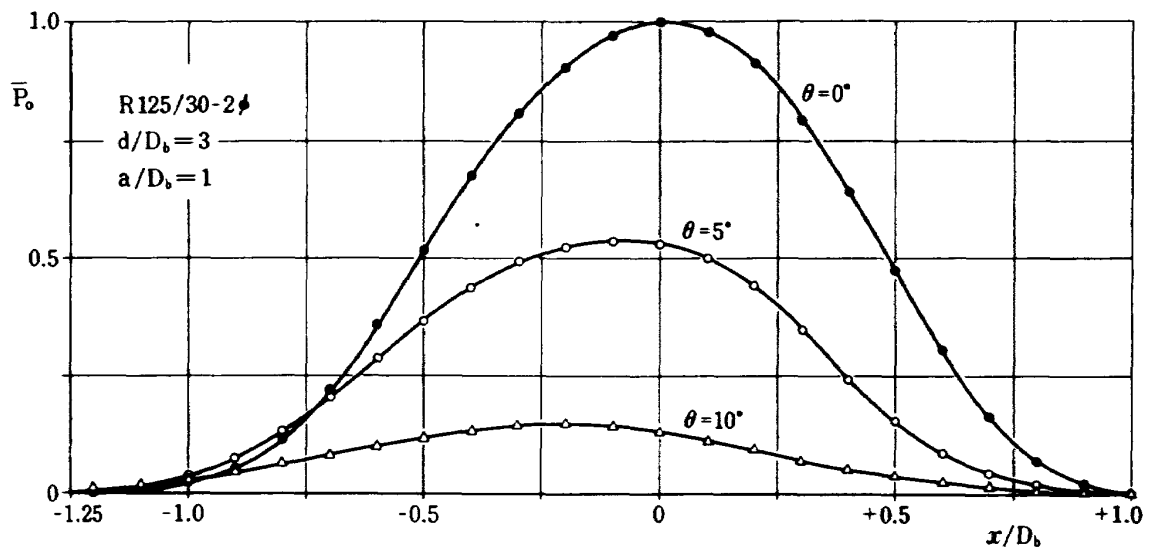


図 33 - (5) 出力波形 (θ の変化)

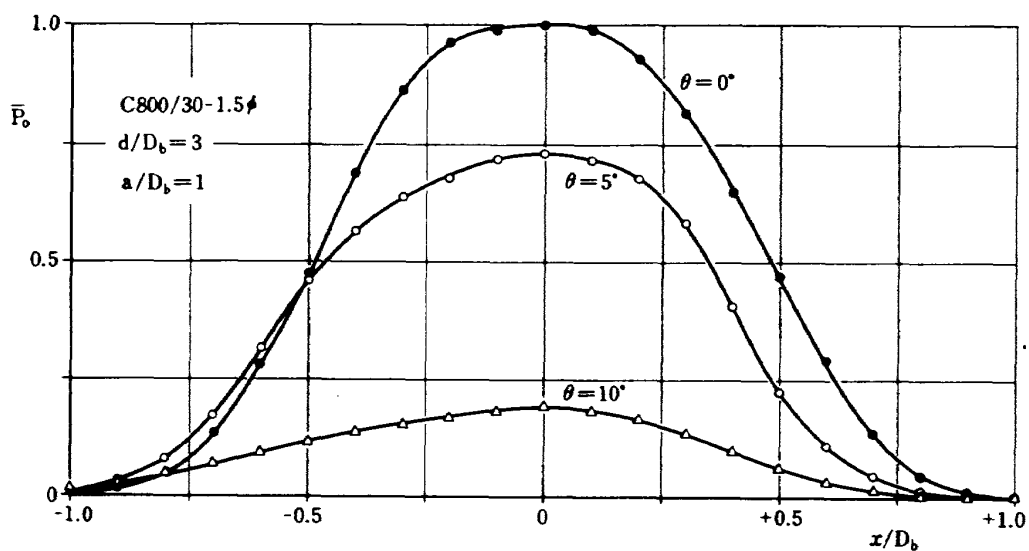


図 33 - (6) 出力波形 (θ の変化)

4. 光源と受光素子及び信号処理回路

4.1 光源の選択

バンドルファイバへ光を入射するには、次のような光源と入射方法が考えられる。

- レーザー管を使用。バンドルファイバへ直接、或いはレンズで集光して入射。
- 電球、放電管を使用。レンズで集光して入射。
- レーザダイオード(L.D)，LEDを直接、或いはレンズで集光して入射。
- ビーム状光束を放射する電球、放電管を使用。多数のバンドルファイバに直接入射。

ここで a), b) の方法では、光源の放射束口径が 1ϕ 以下であるため光源がプローブの数だけ必要であるが、b), d) の方法では数本のプローブの送光端をまとめて、これに入射することにより光源はプローブの数より少なくできる。図 34 は a)～d) について具体的な方法を図示したもので、表 3 に各光源について光パワー密度を実測した結果を示す。光源の選択には必要な光パワー密度が得られることの他に、波長分布特性、寿命、付属電源装置、冷却方法、価格などが考慮されるが、本測定法では多数のプローブを同時に使用するため、b), d) の方法が良い。さらに電球型の光源では b) の方法のようにレンズで放射光を集束するが、光源自体がビーム状光束を放射できる d) の方法では、光ファイバへの入射効

率、取扱い及び光源の小型化の点で有利である。このような光源には、ハロゲン球、放電管を凹面反射鏡の焦点に置いてビーム状光束を得るものがあり、いずれもスポットライト、プロジェクター用または

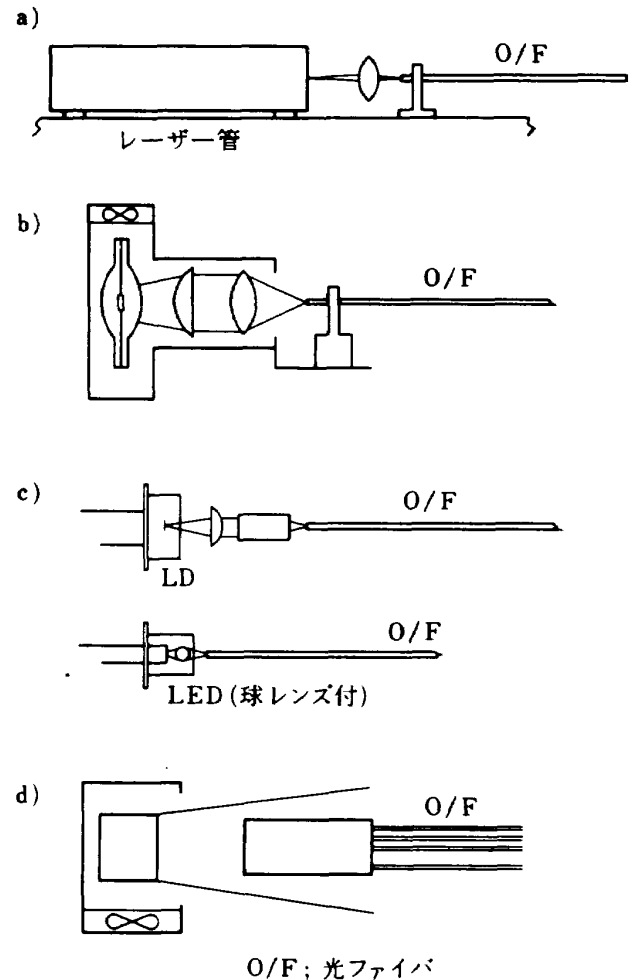


図 34 光源と入射方法

表 3 光源の種類と光パワー密度 (実測)

光 源	出 力 仕 様	入射光口径	光パワー密度 [W/cm^2]	測定位置
レ ー ザ ー 管	$H_e - N_e$ 3mW	1ϕ	0.37	
	$H_e - N_e$ 25mW	1ϕ	3.1	
L E D	球レンズ付 2mW	1ϕ	0.26	
	3mW	1ϕ	0.022	
キセノン放電管	300W+凸レンズ (付図1参照)	2.5ϕ	5 以上	レンズより
		10ϕ	1.7 以上	50 ~ 70mm
		$20\phi \sim 100\phi$	0.5 以上	
	150W (特殊構造品 図 35 参照)	1ϕ	5 以上	レンズより
		6ϕ	3.8 以上	80mm
			1.3 ~ 1.9	
ハ ロ ゲ ン 球	250W+半凸レンズ	7ϕ	0.9 以上	レンズより
		15ϕ	0.7 以上	35mm

車輛，航空機の燈火用である。

電球，放電管の光源では，光源光に赤外線が含まれるため，照射による送光端の温度上昇が問題となる。これは 3.1 (4) に述べたように，光ファイバ素線を束にして固定する際に使用する接着剤が，温度上昇により溶出して入射面を覆ってしまうことによる。従って光源の選択として，光の波長分布が赤外域に広がっているタングステン球，ハロゲン球などは，得られる光パワーの割に照射面の温度上昇が大きく，可視～近赤外の波長分布を持つキセノン放電管の方が条件は良い。しかし放電管の場合は点弧及び安定化電源が必要で，ハロゲン球に比べ価格は高くなる。

以上の検討結果より，光源には図 35 に示すキセノン放電管を選択した。これは入力 150 W で，反射鏡を一体化して金属とセラミックで密封された特殊なもので，放射光はほぼ平行なビーム状光束である。この光源を用いて送光端面の温度上昇を調べるために，図 36 に示すような光ファイバ素線を 16φ の金属管に充填したもの（模擬送光端）を製作し，埋め込んだ熱電対で送光端面と内部の温度を測定した。模擬送光端には，冷却効率を高めるため図に示すような冷却フィン（厚さ 0.1 mm，深さ 4 mm の真鍮板）を挿入したものも試作した。測定は図 37 に示す光源装置にて行なった。図にて模擬送光端を電動ファンにて側方から冷却している。光源と送光端距離 l を 23 mm（光源直前）～ 55 mm として模擬送光端の温度を測定した結果を図 38 に示す。これより表面温度 T_s ，内部温度 T_i （表面より深さ 1 mm の

位置）ともに 200℃ 以下であり，さらに冷却フィン付の模擬送光端では，150℃ 以下に保つことが可能である。なお使用した放電管の寿命は約 1000 時間，強性冷却ファン及び専用安定化電源装置が付属している。

4.2 受光素子の選択

受光素子の選択には，感度，応答性，光ファイバとの結合，使い易さ（形状），価格などが考慮されるが，特に本検出器の応答性能が受光素子で決まるため，反射光の立ち上り波形に充分追従する応答性が必要である。また波長感度特性はなるべく光源の波長分布特性と一致することが重要である。応答性の高い受光素子としては，光電子倍增管，アバランシヨフォトダイオード (A.P.D)，P・I・N フォトダイオード (P・I・N) があり，何れも周波数帯域は数十～数百 MHz である。このうち光電子倍增管は形状が大きく，高電圧電源が必要であることなど取

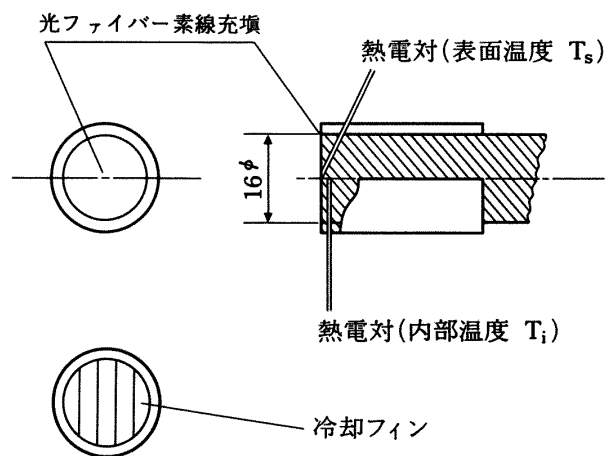


図 36 模擬送光端

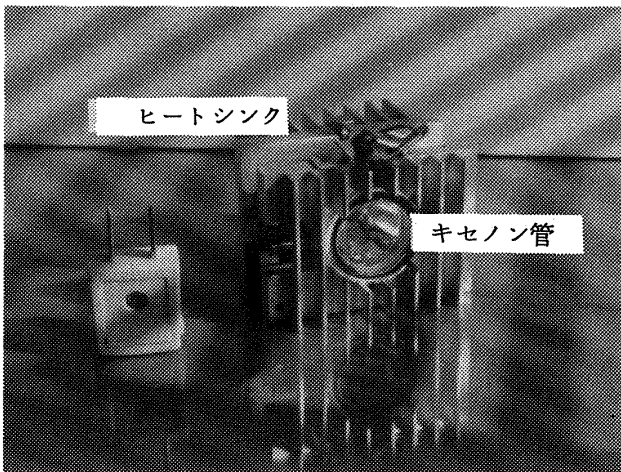


図 35 キセノン放電管

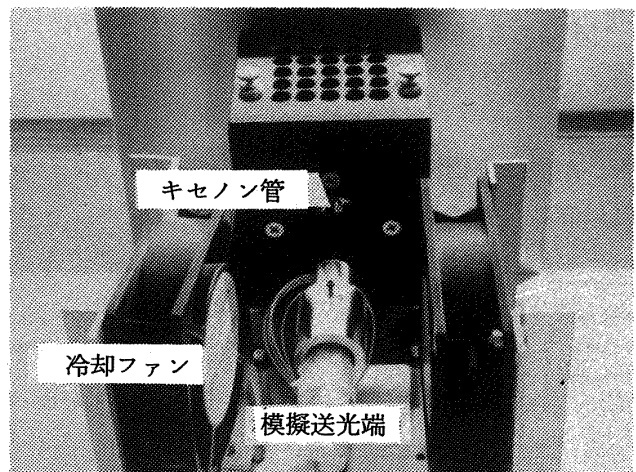


図 37 光源装置

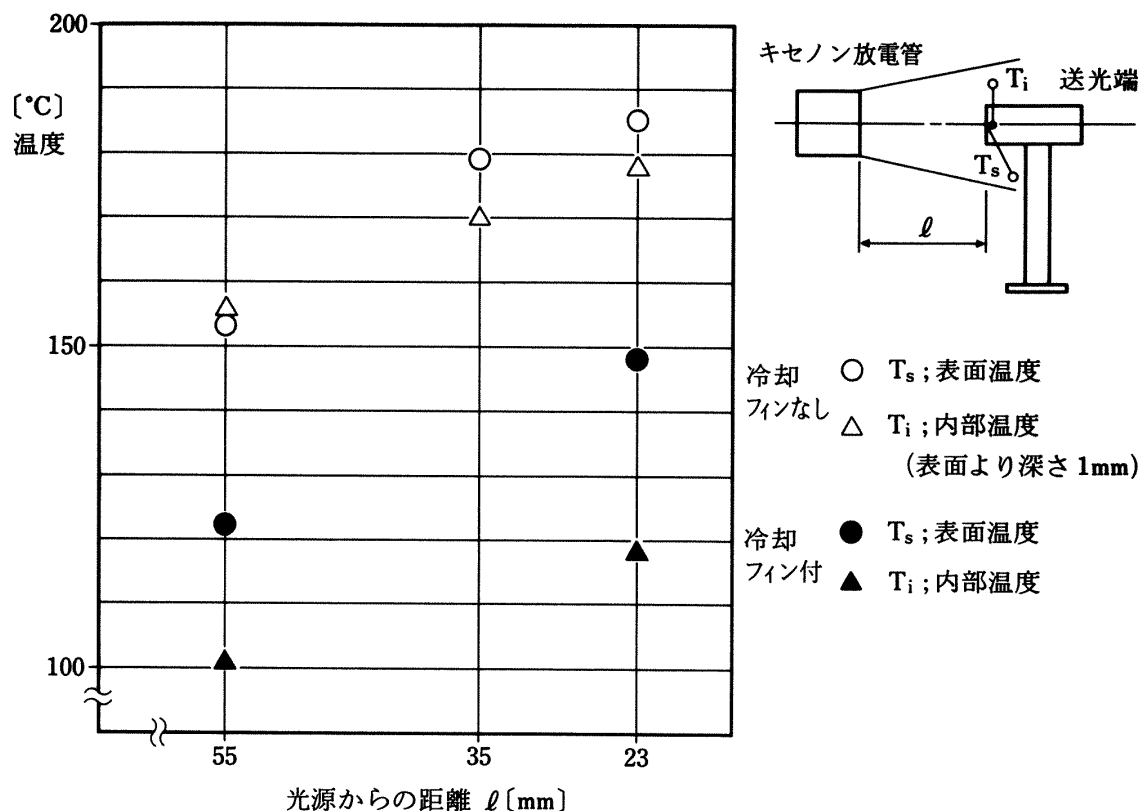


図 38 模擬送光端の温度上昇測定結果

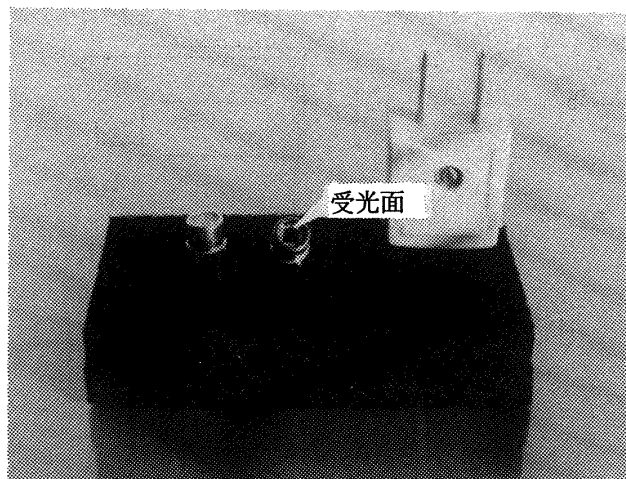


図 39 受光素子 (アンプ内蔵型 PIN フォトダイオード)

扱いが面倒で価格も高い。A・P・D は素子自体の感度は高いが、受光部面積が小さく、バンドルファイバとの結合にはレンズによる絞り込みが必要である為、結合効率が低くなる欠点がある。一方 P・I・N は感度が低く、本質的に増幅が必要であるが、受光部に広い面積を持つものがあり、またシリコン系のものは 4.1 で述べたキセノン放電管と同様に可視～近赤外に波長感度域を持っている。以上より本検出

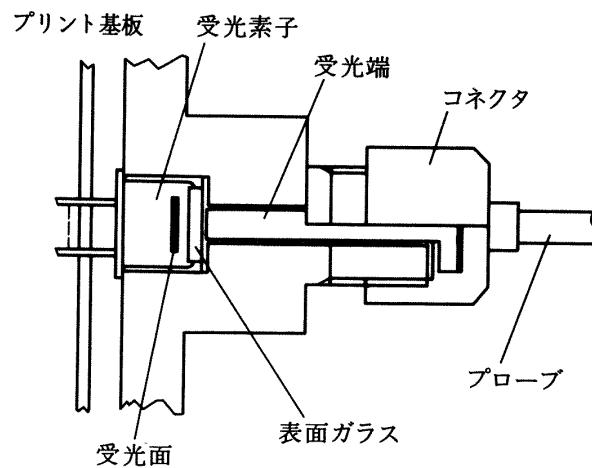


図 40 プローブと受光素子の結合方法

器では増幅器を内蔵した受光素子を選択した。これは図 39 に示す形状のもので、1つの IC ケース内に P・I・N フォトダイオードと低ノイズアンプを封入したものである (表 4 に性能を示す)。この場合プローブとの結合は受光面が 2.5ϕ と大きい為、図 40 に示すような単純な方法で良く、結合損失 L_p は R30-1 ϕ プローブを用いて実測した結果、 $-0.25 \sim -0.5$ dB であった。

表4 アンプ内蔵型PINフォトダイオードの特性

	感度(LED)	立ち上り	受光面	雑音(r.m.s)
タイプA	1.8×10^4 [V/W]	28 [ns]	2.5 ϕ	0.3 [mV]
タイプB	6.0×10^4	90 [ns]	2.5 ϕ	0.9 [mV]
備考	$\lambda = 0.9 \mu\text{m}$	10%~90%		

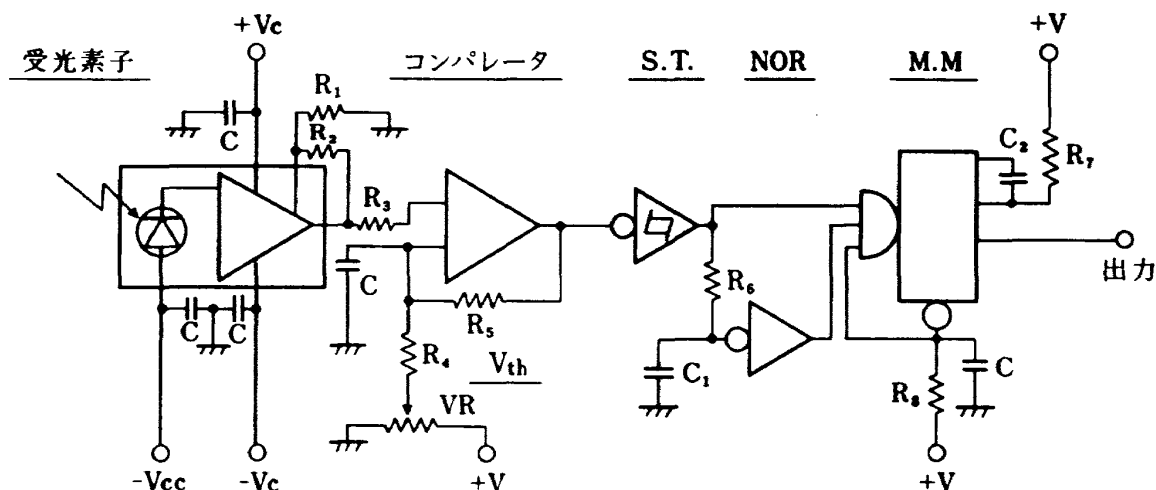


図41 信号処理回路

4.3 信号処理回路

信号処理回路は、受光素子周辺部回路と受光素子出力を矩形波に整形するコンパレータ、一定の時間幅のパルス波を出力する単安定マルチバイブレータ(M.M.)の論理回路からなる。受光素子周辺部分は、比較的高周波のアナログ増幅回路であり、アースの配置、電源回路の低レイズ化、部品の選択と配置に留意した。コンパレータの問題点として、チャタリング現象による誤動作がある。これはアナログ信号をパルス波形に変換する場合必ず問題となるもので、アナログ信号がコンパレータのスレッシュホールドレベルを通過する時に、信号に含まれるレイズのためコンパレータ出力がオン-オフを繰り返す現象である。特にコンパレータの後段に、コンパレータ出力でトリガする回路があると、波形の立ち下り時のチャタリングで多重のトリガをかけるため、1つのアナログ入力に対し数個のパルス出力を生じてしまう。従ってこれを防ぐ回路上の工夫が必要とされるが、ここではまず a) コンパレータ素子の選択、b) ヒステリシス特性の付加、c) 電源、スレッシュホールド電圧の安定化と低ノイズ化、に留意し、さ

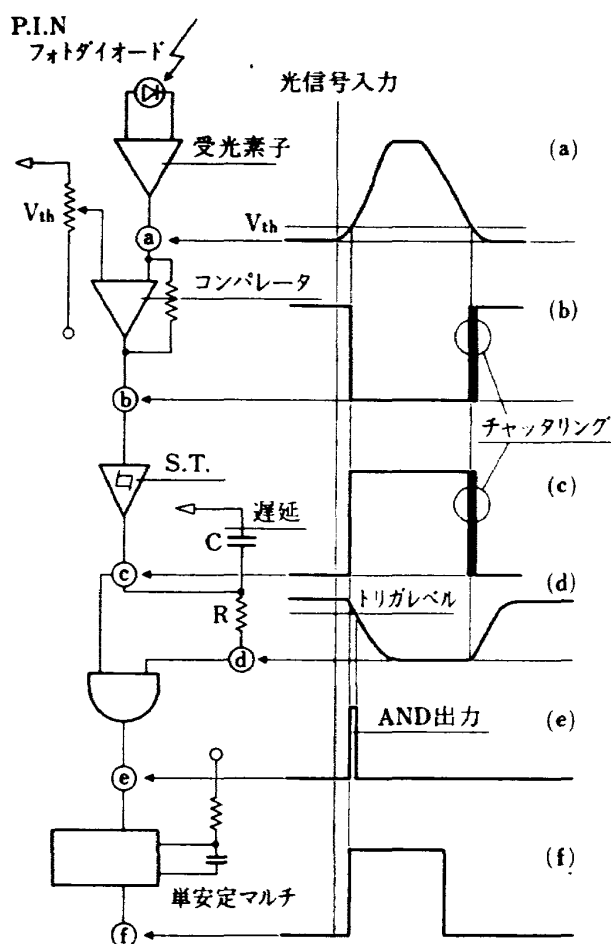


図42 信号処理回路の動作

らにM.M. のトリガ回路にC・Rの遅延回路による多重トリガ防止回路を挿入した。図41に信号処理回路を、また図42に各点の電圧波形を示す。図41

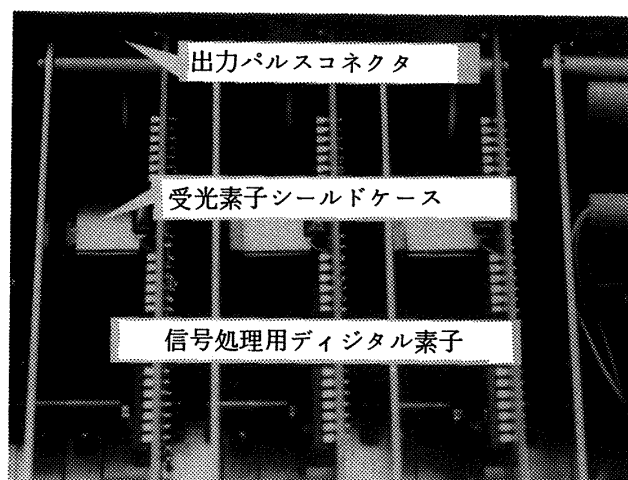


図43 信号処理回路基板

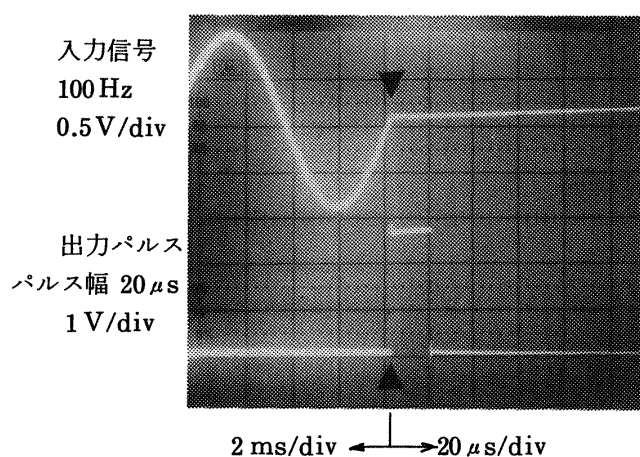


図44 信号処理回路動作例

にてシュミットトリガ(S.T.), NORと C_1 , R_6 が遅延回路である。ここで C_1 , R_6 は図42に示すd)の波形のように, S.T. 出力を遅延させてM.M.のANDゲートに入力されるからS.T. 出力の立ち下りではANDゲートが閉じているためにチャタリング部分は無視される。試作した回路動作としては, コンパレータ入力信号振幅0.05V_{p-p}以上, 周波数100Hz以上での正弦波入力で安定に動作することを確認した。なお実際の回路基板は受光素子周辺部と以降とに分け, 受光素子には図43に示すように電磁シールドを施してある。図44に正弦波入力に対する動作例を示す(時間軸は▽印より前後で異なる)。

5. 動翼先端検出器

5.1 検出器の出力信号電圧

以上のように試作, 選択したプローブ, 光源, 受光素子の各性能, 特性値をもとに, 実際の動翼先端検出器に用い得るプローブ仕様を仮定し, 光源, 受光素子と組合せた最終的な検出器出力値を求める。各プローブは次の3種類のもので主な諸元を図45に示す。

プローブA χ ; χ_g
 $l_r = 10$ [m]
 $l_s = 5$ [m]

プローブB χ ; χ_s
 $l_r = l_s = 30$ [m]

プローブ	光ファイバ素線		D_b	プローブの構成 (バンドル方法はランダム型 Ω_R)
	D_{co}/D_{cr}	材質(χ)		
A	27/30 μm	光学ガラス(χ_g)	1.0 ϕ	
B	100/125 μm	石英(χ_s)	1.0 ϕ	
C	27/30 μm 100/125 μm	光学ガラス 石英(χ_{sg})	1.0 ϕ	

図45 プローブの仕様

プローブ C χ ; χ_{sg}

$\ell_r = 10 [\text{m}]$

$\ell_s = 5 [\text{m}]$ (中継コネクタ付)

共通諸元 $D_b = 1\phi$, \mathcal{Q} ; \mathcal{Q}_R

ここで χ_g の素線径としては透過率と曲げ等に対する折損を考慮して $D_{cr} = 30 \mu\text{m}$ とした。 χ_s は $D_{cr} = 125 \mu\text{m}$ である。長さは $[A]$, $[C]$ では χ_g の製作上の制限から 10m , $[B]$ では 30m とした。また $[C]$ は測定時における取扱いを簡便にするため、送光側を分岐に近い点で切断し中継コネクタで接続するようにした。接続方法は図 46 に示すように、

単純に端面同志を接触させる方法である。この場合の接続損失 (L_{cn}) を測定した結果を表 5 に示す。これより L_{cn} はかなり大きいのが、例 3 のように光源側を大口径の石英ファイバにすることにより L_{cn} を大幅に改善することができる。

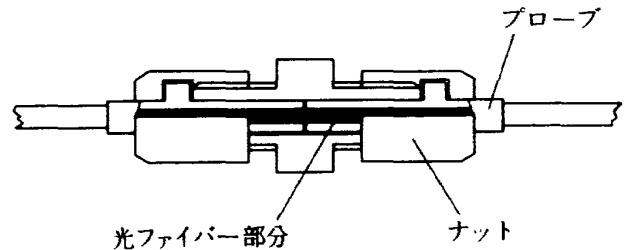


図 46 コネクタによる接続方法

表 5 中継コネクタ接続損失の測定結果

No.	中継接続するバンドルファイバ	接続損失 L_{cn} [dB]
1	$R30-1.2\phi \sim R30-1.2\phi$	-4.7
2	$R125-0.7\phi \sim R125-0.7\phi$	-5.5
3	$R125-0.7\phi \sim$ 単芯 0.7ϕ	-0.9

表 6 プローブの損失計算手順

各 損 失	入力パラメータ	特 性 図	計 算 式
$L_i + L_{ts}$	χ, ℓ_s	X_t ↑ 図 15	$10 \log_{10} X_t$
$L_r + L_{tr}$ ($\ell_r = 1 [\text{m}]$)	χ, \mathcal{Q} d 変化	X_{rt} ↑ 図 26	$10 \log_{10} X_{rt}$
	θ 変化	\bar{P}_o ↑ 図 27	$10 \log_{10} \bar{P}_o$
$L_{tr} (\ell_r = 1 [\text{m}])$	$\chi, \ell_r = 1 [\text{m}]$	図 15	$10 \log_{10} X_t$
L_p L_{cn}	$-0.25 \sim -0.5 [\text{dB}]$ 4.2 より $-5.5 [\text{dB}]$ 表 5 より		
L_T	d 変化 θ 変化	(13) 式 (13) 式 + $10 \log_{10} \bar{P}_o$	

表7 各プローブの損失 ($\ell_r = 1\text{ m}$)

各損失 プローブ	$L_i + L_{ts} + L_{cn}$	$L_r + L_{tr}$		L_{tr}	L_p	L_T $d=1$ $\theta=0$	L_T $d=5$ $\theta=10$	$\frac{L_r + L_{tr}}{L_T}$
		$d=1\sim5$ [mm]	$\theta=10$ [°]					
A	-6.2	-11.5 ∟ -16.7	-1	-4.8	-0.5	-2.3	-29.2	50 ∟ 65
B	-4.6	-12.9 ∟ -18.2	-7.7	-0.59	-0.5	-18.6	-31.6	69 ∟ 82
C	-10.1 ($L_{cn} = -5.5$)	-10.9 ∟ -12.5	-8.2	-4.8	-0.5	-25.9	-35.7	42 ∟ 58
備 考	単位は [dB], 反射体条件 $a/d=1$							単位は%

次に各プローブの性能を 2.2 (2) で示した各損失量より求める。ここで反射体には図 24 に示した ϕ_f が $a=D_b$, $d=1\sim 5\text{mm}$, $\theta=0\sim 10^\circ$ の条件であるとする。これより各損失値及びプローブの全損失を求める手順を表 6 に示す。これより求めた各損失値, 全損失及び全損失に対する反射損失 ($\ell_r=1\text{m}$ を含む) の割合を表 7 に示す。これより各プローブとも全損失は $d=1\sim 5\text{mm}$, $\theta=0\sim 10^\circ$ にて $-19\sim -30\text{ dB}$ (光パワー比で約 $1/80\sim 1/1000$) と非常に大きく, 特に反射損失が全体の $60\sim 80\%$ を占めていることがわかる。また各プローブの比較では, [B] は χ_g と χ_s の伝送損失の差により L_T が少ないが, $\theta \geq 10^\circ$ では損失が増加して L_T は大きくなる。また [C] は L_{cn} の値だけ L_T が多いが, 中継コネクタを用いても [A] とほぼ同程度にすることができる。次に検出器の出力電圧 E_{pd} を求める。ここで光源には図 35 のキセノン放電管を用い, $P_a=1\text{W/cm}^2$ と仮定する。また受光素子は図 39, 表 4 に示したタイプ B ($A_{pd}=6\times 10^4\text{ V/W}$) とする。以上より (13) 式にて求めた E_{pd} を図 47 に示す。これは上述したように各特性図より求めた推定値であり, 値の正確さは各特性測定値の測定誤差で決まるが, 反射体の条件は実際と比較してかなり良い状態であり, 図の出力電圧値は本検出器の性能上限値と考えられる。

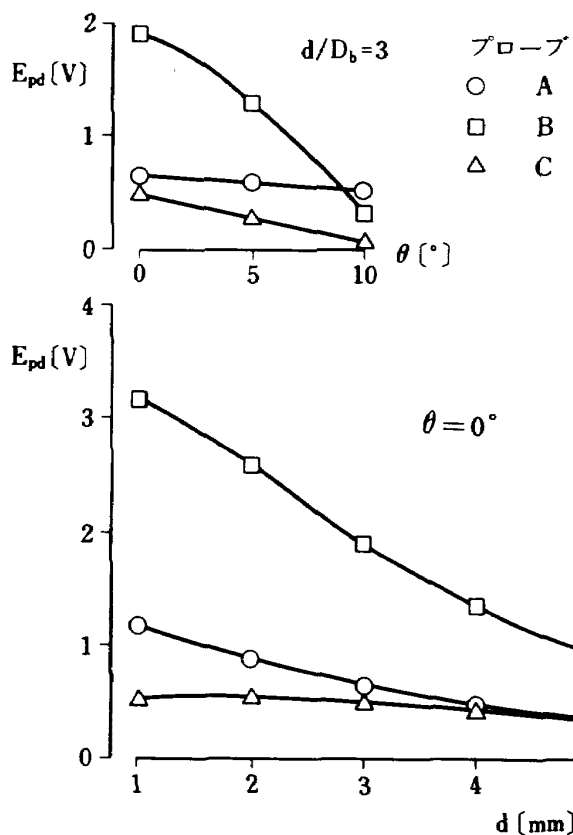


図47 検出器の出力電圧

ここで検出器として必要な E_{pd} の電圧値は, 受光素子の後段に置かれるコンパレータのスレッシュホールドレベル電圧 V_{th} に対し, 最低限 $120\sim 150\%$ 程度である。一方 V_{th} は回路上のノイズ電圧で決ま

るが、経験的に 50～100mV 程度である。従って E_{pd} の値としては 0.06～0.15V 以上必要であるが、これより光源光パワー、 $P_a \geq 1\text{W}/\text{cm}^2$ で良いと言える。また E_{pd} を増加するには P_a 、 D_b を増加すれば良いが、 P_a については上述した光源では十分な余裕がある。

5.2 検出器の測定誤差

検出器の測定誤差は、図 7 に示したように E_{pd} の立ち上がり部分での時間遅れ t_d の変動で表わせる。ここで t_d の変動を決定する要因は次のように分けられる。

- (1) 検出器構成要素の劣化、寿命等により諸損失が増加する。
- (2) 電源の変動等による定常的変動。
- (3) 測定対象の動翼とプローブ間の相対位置が非定常的に変動する。

(1) はプローブの光ファイバ素線の折損、投射端の汚れ、傷などの性能劣化、光源の寿命による光源光量の減少、動翼表面の汚れによる反射率低下など、現在の出力値が徐々に低下する為に生じる t_d の変動である。(2) は電源電圧の変動に伴ない光源光量、信号処理回路での諸電圧値が変動するため、出力値が一定レベルを中心として定常的に変動するために生じる。(3) は(1)、(2) と異なり、動翼振動測定時には必然的に伴う変動で、動翼の振動及びプローブの装着部（ケーシング等）の振動により、プローブ～動翼間の距離 (d)、角度 (θ) が変動し、出力値、出力波形

が変化することによる。以上述べた出力値の変動と、 t_d の変動値との関係を求める。まず E_{pd} が図 48 に示すように、 $V_a \sim V_b$ 間を変動すると仮定する（この場合出力波形は図のように直線で近似できると仮定している）。ここで t_d の変動は、2.2 で述べたように $t_b - t_a$ の変動であるから、

$$\left. \begin{aligned} t_a / t_m &= V_{th} / V_a \\ t_b / t_m &= V_{th} / V_b \\ V_m &= (V_a + V_b) / 2 \end{aligned} \right\} (30)$$

いま E_{pd} の変動率を \tilde{V}_o とすれば

$$\tilde{V}_o = (V_a - V_b) / V_m \quad (31)$$

(30) 式より

$$\left. \begin{aligned} V_a &= (\tilde{V}_o + 2) \cdot V_m / 2 \\ V_b &= (2 - \tilde{V}_o) \cdot V_m / 2 \end{aligned} \right\} (32)$$

(30)、(31)、(32) より

$$\left. \begin{aligned} t_a &= 2 \cdot V_{th} \cdot t_m / (\tilde{V}_o + 2) \cdot V_m \\ t_b &= 2 \cdot V_{th} \cdot t_m / (2 - \tilde{V}_o) \cdot V_m \end{aligned} \right\} (33)$$

$$\therefore t_b - t_a$$

$$= 4 \cdot V_{th} \cdot \tilde{V}_o \cdot t_m / (4 - \tilde{V}_o^2) \cdot V_m \quad (34)$$

ここで V_{th} の V_m に対する比を \overline{V}_{th} 、 $t_b - t_a$ の変動率すなわち測定誤差を $\tilde{\delta}_1$ とすれば、

$$\tilde{\delta}_1 = (t_b - t_a) / t_m = 4 \cdot \tilde{V}_o \cdot \overline{V}_{th} / (4 - \tilde{V}_o^2) \quad (35)$$

ここで

$$4 - \tilde{V}_o^2 = 4 \left(1 - \frac{\tilde{V}_o^2}{4} \right) \div 4 \quad \text{より}$$

$$\therefore \tilde{\delta}_1 = \tilde{V}_o \cdot \overline{V}_{th} \quad (36)$$

以上より測定誤差は E_{pd} の変動率と、 V_{th} の V_m に対する比を乗じた関係となる。これより(1)、(2)の原因による出力値の変動は直接測定誤差に影響するが、何れも V_m が高い値であれば誤差は小さいことから、検出器出力を充分大きくとる必要がある。

ここで変動が短時間内（数十分～1時間程度）ではほぼ一定と考えられる場合には、本検出器を用いた動翼振動計測法の方法により、(1)、(2)の原因による誤差は除去できる。この方法は、測定直前における動翼非振動時の測定値を基準として、基準に対する振動測定値の変化分のみを抽出して計測を行う方法で、^{1), 4)} 上述した変動分は両測定値にバイアス分として含まれるため、最終的な振動測定値には含まれない。

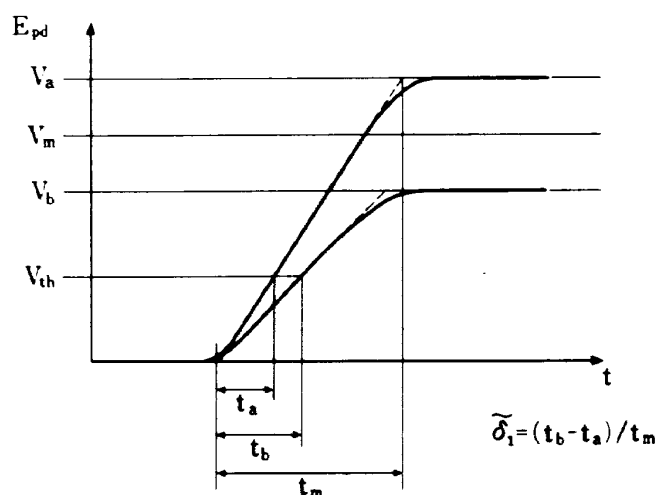


図 48 測定誤差 $\tilde{\delta}_1$ の定義

次に d , θ が (3) の原因により変動する場合の測定誤差を、図 32, 図 33 で示した出力変化特性より求める。いま図 49 に示すように異なる E_{pd} の波形 $g(1)$, $g(2)$ …… $g(k)$ が V_{th} と交差する位置と動翼が検出端を横切る位置 ($x/D_b = -1$ の位置) との間隔を $x_g(1)$, $x_g(2)$ …… $x_g(k)$ とすれば、このうちの最大値 $x_g(a)$, 最小値 $x_g(b)$ より測定誤差 $\tilde{\delta}_2$ を次のように定義する。

$$\tilde{\delta}_2 = (x_g(a) - x_g(b)) / D_b \quad (37)$$

従って $\tilde{\delta}_2 = 1$ の誤差値は D_b に相当する振動幅の大きさを表わしている。以上より図 32 ~ 図 33 にて求めた誤差値を表 8 に示す。ここで V_{th} は $d/D_b = 3$, $\theta = 0^\circ$ での E_{pd} の最大値 ($x/D_b = 0$ の位置) を 1 として, 0.25, 0.15, 0.05 とした。これによれば d の変動に対しては, $\tilde{\delta}_2$ は V_{th} の増加にほぼ比例し, プローブ [A] が [B], [C] に比べ $\tilde{\delta}_2$ が大きい。

θ の変動に対しては V_{th} と $\tilde{\delta}_2$ の関係は一様でなく, 動翼の進行方向とプローブの傾きの違い (θ の正負)

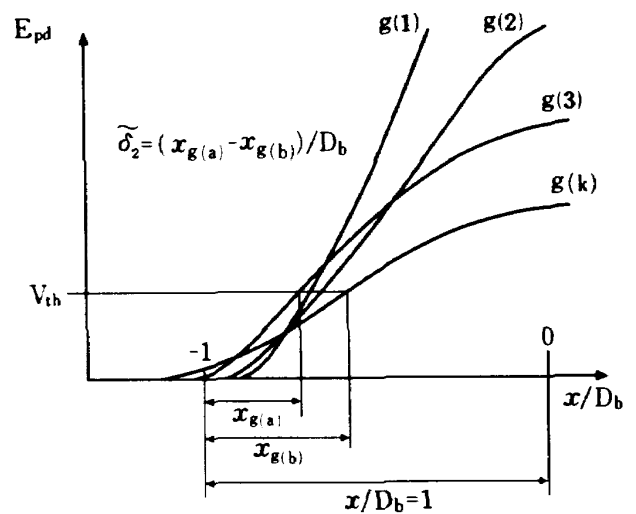
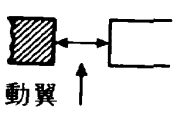
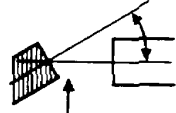
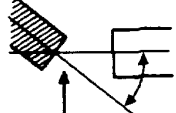


図 49 測定誤差 $\tilde{\delta}_2$ の定義

表 8 d , θ の変動による測定誤差 $\tilde{\delta}_2$

変 動 状 態	プローブ	A	B	C
	V_{th}			
$d/D_b = 1 \sim 5$ 相当  動翼	0.25	0.44	0.24	0.26
	0.15	0.24	0.12	0.17
	0.05	0.09	0.05	0.06
$\theta = 0 \sim 5^\circ$ 	0.25	0.23	0.025	0.035
	0.15	0.22	0.015	0.015
	0.05	0.2	0.06	0.05
$\theta = 0 \sim 10^\circ$	0.25	0.41	—	—
	0.15	0.4	0.41	0.52
	0.05	0.37	0.33	0.1
$\theta = 0 \sim 5^\circ$ 	0.25	0.23	0.13	0.24
	0.15	0.22	0.125	0.21
	0.05	0.22	0.15	0.16
$\theta = 0 \sim 10^\circ$	0.25	0.49	—	—
	0.15	0.47	0.43	0.9
	0.05	0.38	0.32	0.44
備 考	D_b に対する値			

にも大きく影響される。特に[B], [C]ではこの傾向が顕著であり、また $\theta \geq 5^\circ$ では E_{pd} の値そのものが小さいため、 V_{th} の設定値によっては非常に大きい誤差を生じる恐れがある。

5.3 検出器の出力信号と実機装着例

5.1で述べたプローブ[A], [B], [C]に対応して、実際に次の3種類のプローブを製作した。

プローブ[A'] [A]と異なる仕様は $D_b=1.7\phi$

プローブ[B'] [B]と異なる仕様は $\Omega; \Omega_H$

プローブ[C'] [C]と同一仕様

ここで[B']は製作上、石英光ファイバ素線を均一にランダムにすることが難かしいため、バンドル方法を半円型とした。図50は[C']プローブの外観を示したものである。次に[A'], [B'], [C']各プローブについて表7より求めた E_{pd} の計算値と、測定した結果を表9に示す。ここで反射体、測定条件及び受光素子感度は5.1と同様である。これより放射光パワー P_s は計算値より減少し、[B']ではかなり減少幅が大きい。これはプローブ長が30mと長いいため、実際の製作では光ファイバ素線の充填が均一にならないため、 S_i が計算値より減少するからであろうと思われる。また E_{pd} についても、各プローブとも同様な理由により計算値よりかなり低い値を示す。以上より実際に検出器を使用する場合には、光源光パワーを計算値より50%以上高くする必要がある。

次に出力信号波形を求めるため、図51に示すような方法でアルミの反射体($a=2\text{mm}$)通過に対す

る[C']プローブの E_{pd} を観測した。条件としては $d=1\sim 5\text{mm}$, $\theta=0\sim 10^\circ$ で行なった。回転数は1020rpmで、反射体の回転周長(測定位置の回転円周長)は40mm、また電源部に25mV p-pのパルス

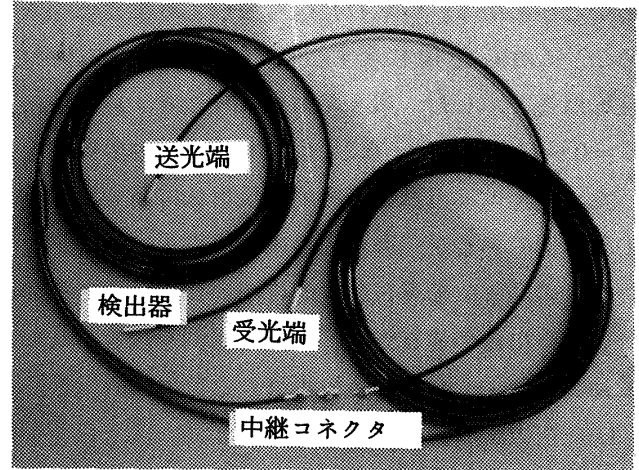


図50 プローブ[C']

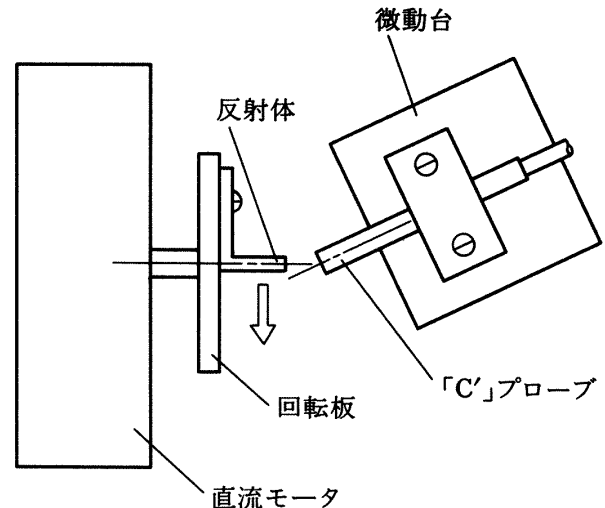


図51 出力信号波形の観測

表9 プローブの出力電圧測定結果

プローブ	A (計算値)	A' (測定値)	B (計算値)	B' (測定値)	C (計算値)	C' (測定値)
P_i	2.63 [mW] (1.2 ϕ)		2.0 [mW] (0.7 ϕ)		2.0 [mW] (0.7 ϕ)	
P_s	0.83 [mW]	0.77 [mW]	0.525 [mW]	0.34 [mW]	0.17 [mW]	0.16 [mW]
減少比		93 [%]		65 [%]		94 [%]
E_{pd}	0.95 [V]	0.8 [V]	1.16 [V]	0.85 [V]	0.52 [V]	0.35 [V]
$\theta = 0 [^\circ]$		84 [%]		73 [%]		67 [%]
$d = 1 [\text{mm}]$						
備考	*「B」と比較するために、図21-(1)の計算値より Ω_R/Ω_H の比を求め換算した。					

性ノイズを含ませ、これより $V_{th} = 32\text{mV}$ とした。観測波形の一部を図 52 に示す。図において上段の波形はコンパレータ出力、下段は E_{pd} である。また $\theta = 10^\circ$ では波形の形状が図 33 - (5) と同様に変わることがわかる。得られた信号波形より誤差値を求めた。これを表 10 に示す。表にて誤差値は $x_g(k)/$ 回転周長で示した。以上の結果より、 $d = 1 \sim 5\text{mm}$ 、 $\theta = 0 \sim 10^\circ$ では $\delta_2 = 0.3$ 、回転周長の 0.12 % であった。以上は検出器を模擬的な反射体に用いた場合の動作例であるが、著者等は本検出器をジェットエンジンのファン動翼振動計測に用いた。以下にその概要、検出器の装着方法、出力信号例を示す。なお振動計測結果、全体の装置等はここではふれない。⁷⁾

(1) 空力試験機 F30 の動翼振動計測

フロントファンエンジン FJR710 の研究開発に伴

なう実機の 70 % スケールモデル、フロントファン単独試験機 F30 の動翼振動計測を本検出器を用いて行なった。F30 はファン動翼周長 790^ϕ 、動翼枚数 33、反射面としての動翼先端幅は約 1~2mm で中仕上げ程度の鉄表面である。図 53 に前面から見た F30 を示す。図の上部の 7 カ所の光点は、検出端からの光の反射である。検出器はケーシング上の動翼翼弦中心上方に 42 箇所、 2.5^ϕ の穴を一行に開け接着テープで固定した。図 54 にケーシング上に装着した検出器の様子を示す。この計測に使用したプローブは、前述したプローブ [A'] と同一の仕様で、図 55 に示すように 27 本分の送光端を 1 つにまとめ、これを 2 個合せて光源の前面においた。この送光端部は図に示すように半円状で、取扱い及び放熱効果などの点を考慮してある。図 56 は送光端部を示し

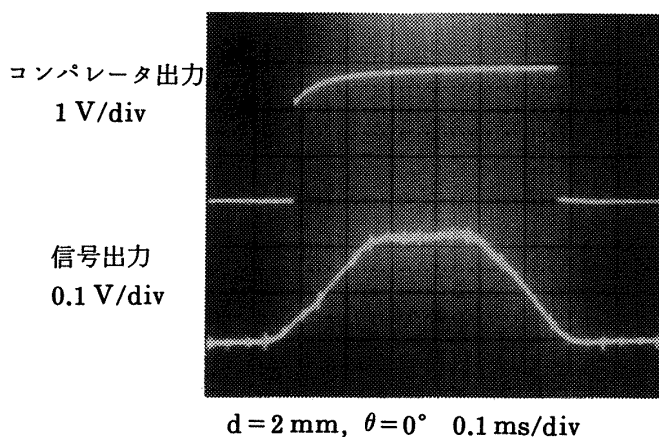


図 52 - (1) 回転反射体での出力信号波形

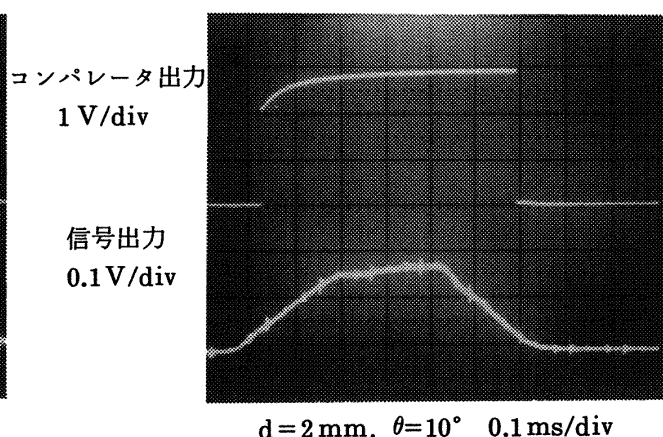
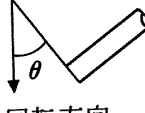
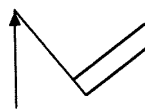


図 52 - (2) 回転反射体での出力信号波形

表 10 回転反射体での d 、 θ の変化に対する誤差測定結果

$d[\text{mm}]$	$\theta[^\circ]$	$E_{pd} [\text{V}]$	$x_g(R)/$ 回転周期	備 考
1	0	0.36	0.34×10^{-3}	1 周期時間 59 [ms] V_{th} 0.032 [V] プローブ
2	0	0.22	1.02×10^{-3}	
3	0	0.16	1.53×10^{-3}	
4	0	0.1	2.20×10^{-3}	
5	0	0.07	2.54×10^{-3}	
3	5	0.14	1.53×10^{-3}	
3	10	0.07	2.20×10^{-3}	
3	5	0.15	1.69×10^{-3}	
3	10	0.08	2.54×10^{-3}	

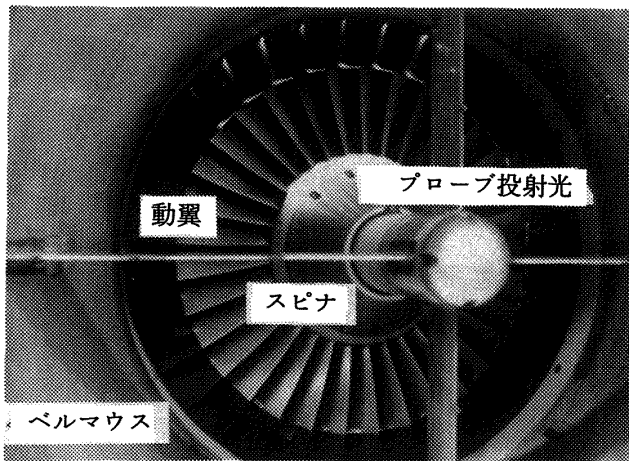


図 53 空力試験機 F30

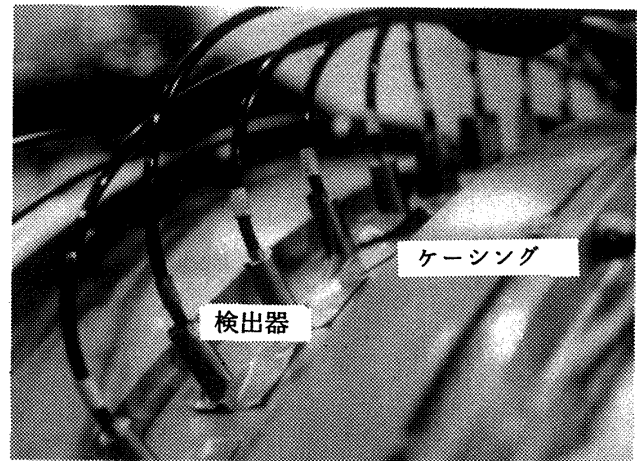


図 54 F30 ケーシングへの検出器の装置

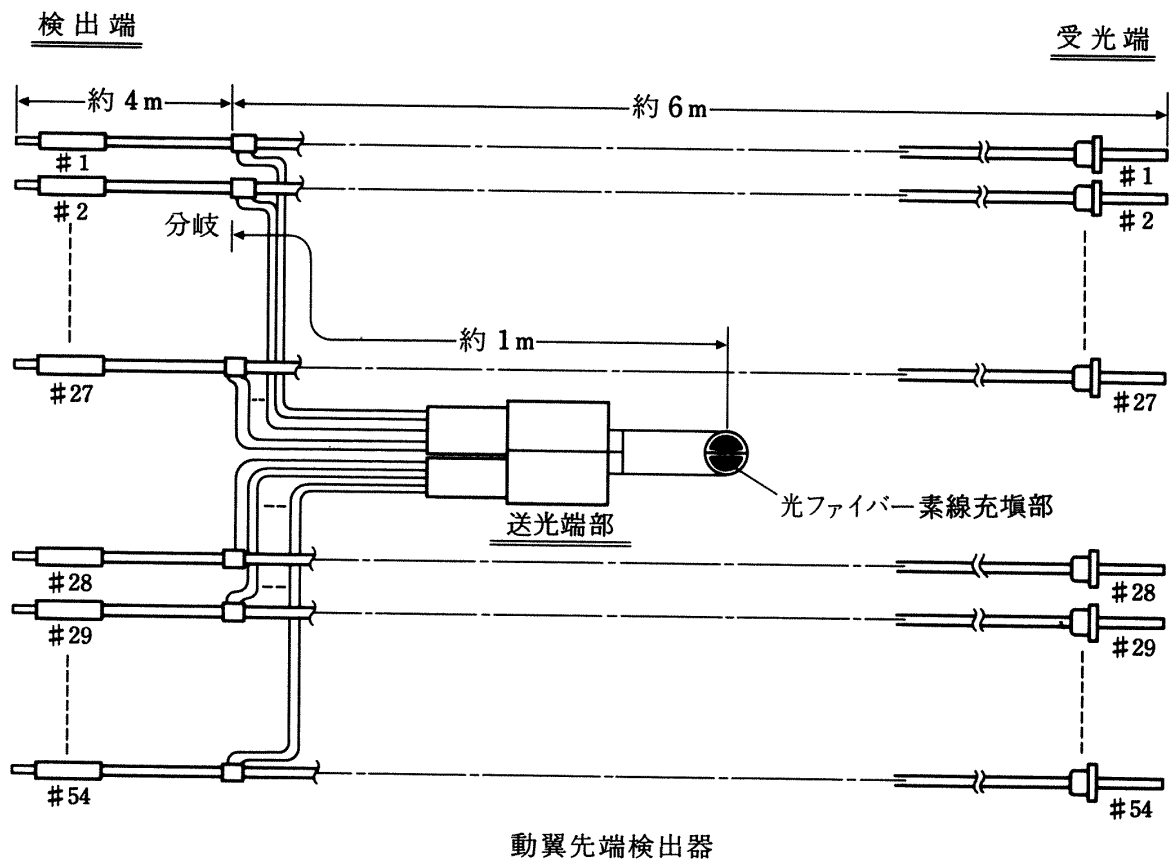


図 55 実機計測用動翼先端検出器プローブ

たもので、図左のものは図 36 と同様な入射部に薄板の冷却フィンを挿入して放熱効果を狙ったものである。また受光端の形状は図 57 に示すように同軸プラグ状にした。信号処理部は計測ラック取付用ケースに 10 チャンネル分を組込んだ。これを図 58 に示す。図 59 は信号処理部の前面パネル部分を拡大したもので、左側は V_{th} 電圧のチェック端子と電圧調整バーニア、右側は上から出力コネクタ、 E_{pd} 電圧モニタ端子、プローブ受光端コネクタである。

次に動翼振動計測ではケーシング上の検出器の他に動翼に対し非振動点通過を検出する検出器（基準信号検出器）が必要である。ここでは、図 60 に示すように動翼前部のスピナに幅 2mm 程度の黒印をつけ、他の反射部分は良く磨いて反転出力による基準信号を得ている。図 61 に基準信号出力の一例を示す。図で上段波形は E_{pd} 出力で、黒印の点（中央の出力が低下した点）にて検出器出力パルスを得ている。また図 62-(1)は同時に計測した動翼先端検

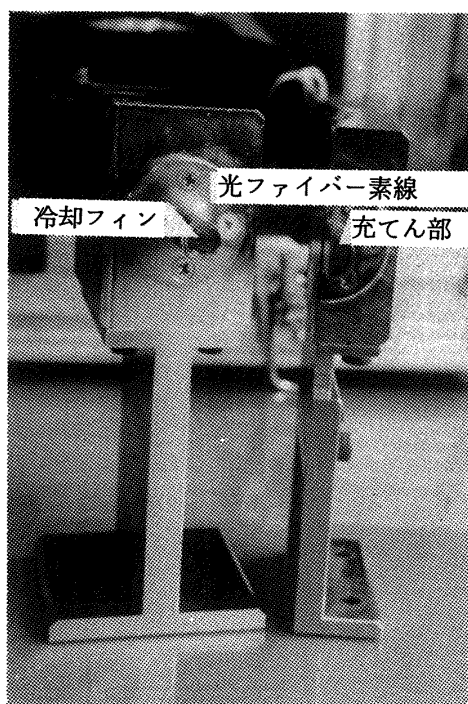


図 56 送光端部

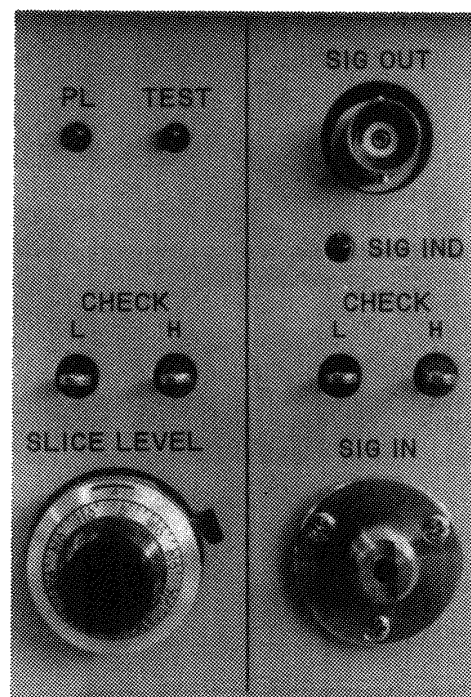


図 59 信号処理部の前面パネル部分

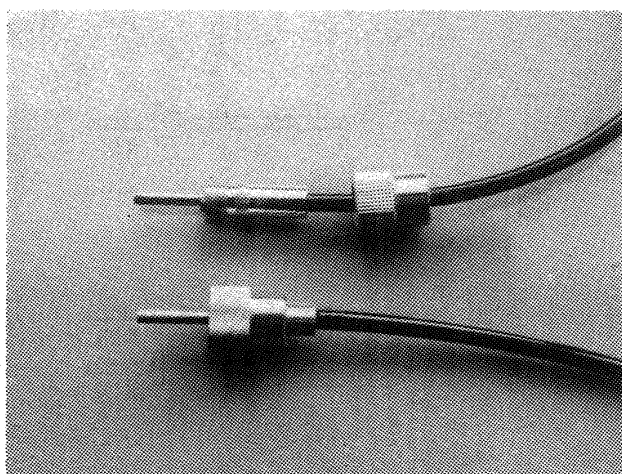


図 57 受光端コネクタ

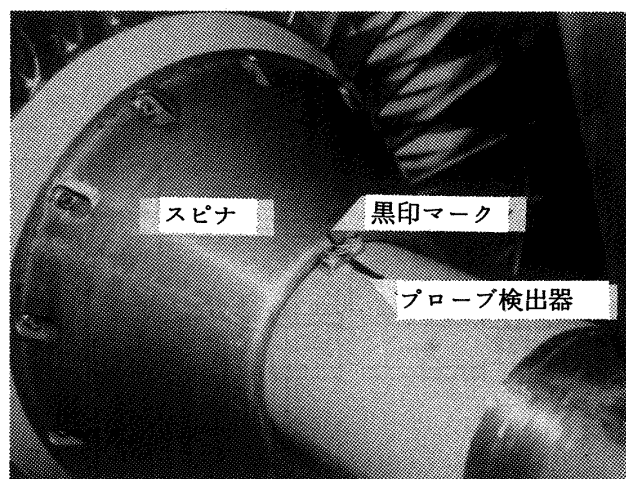


図 60 F30 (基準信号検出器の装着)

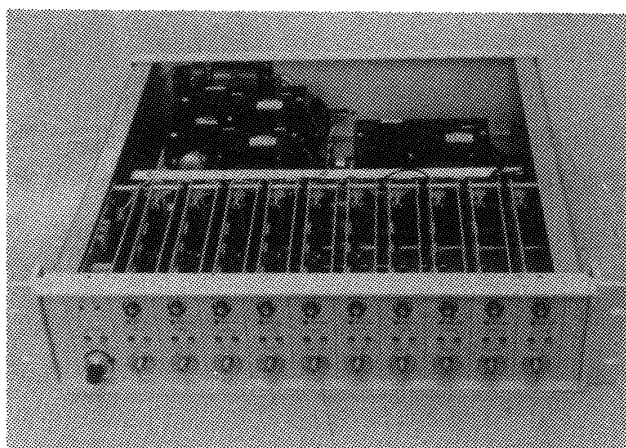


図 58 信号処理部ユニット (10 チャンネル)

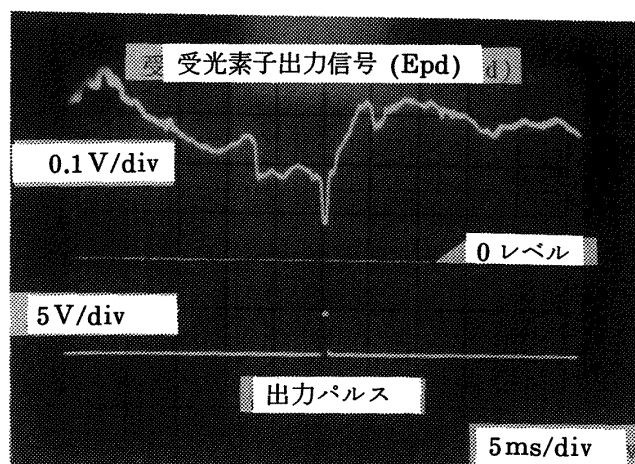
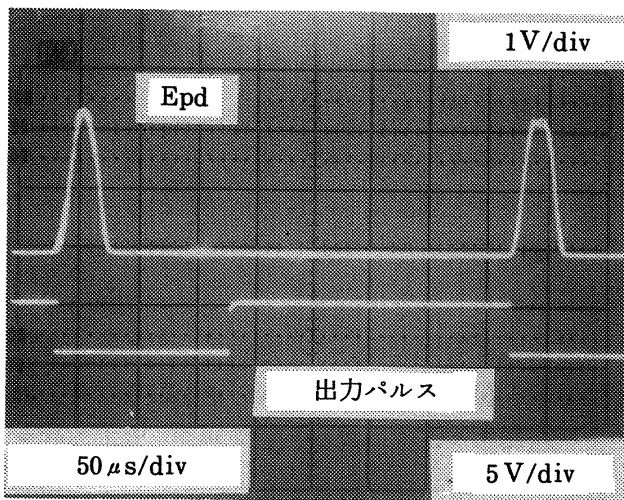
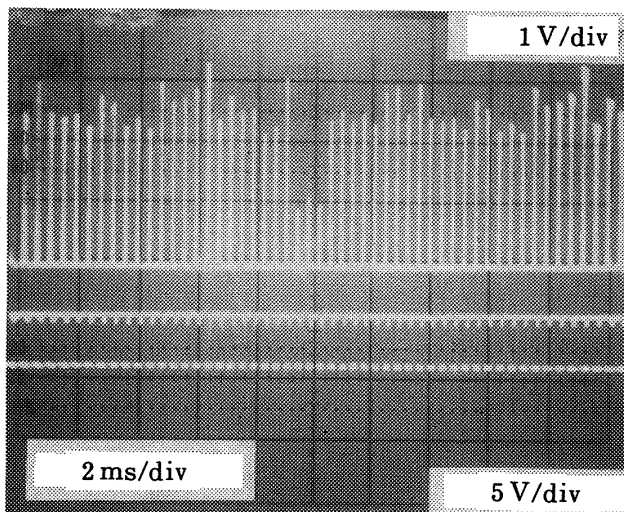


図 61 基準信号検出器出力波形 (F30)



F30 4600 [r・p・m]

図 62 - (1) 検出器出力信号



F30 4600 [r・p・m]

図 62 - (2) 検出器出力信号

出器の E_{pd} の一例で、上段は E_{pd} 、下段は出力パルス（負出力）である。図 62 - (2) は時間軸を長くして全動翼信号を観測したもので各動翼先端の反射率の差により、振幅にかなり差違が生じている。

(2) FJR710 ファン動翼振動計測

FJR710 の耐環境性試験である横風試験⁸⁾、ディストーション試験⁹⁾にて、ファン動翼の振動計測を本検出器を用いて行なった。使用したプローブ、光源等は (1) と同じものである。この計測では基準信号として、図 63 に示すようにファン動翼のディスク上に付けられたボルトの頭の通過より得ている。ま

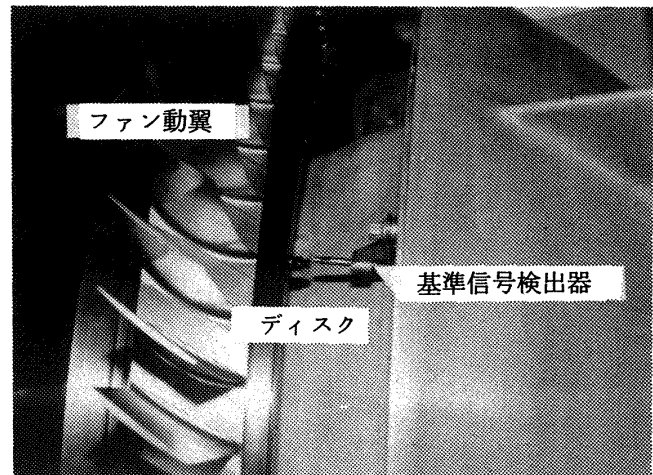


図 63 FJR710 (基準信号検出器の装着)



図 64 FJR710 (動翼先端検出器の装着)

た動翼先端検出器は、図 64 に示すようにファンケーシング上に L 型の押さえ金具で取付けてある。検出器数は同一円周上に 46 本、一部 2 本ずつ動翼の翼弦に対応して配置しており総数は 60 本である。実験では回転数の増加に伴ない、ケーシングの変形、動翼の延伸が生じ、 d が 0 ～ 3mm 程度変化したが、計測が可能な出力は得られた。しかし実験途中にて、ローター軸受潤滑用の油が飛散し、これが検出端面に付着して検出器出力が得られない事が起った。この場合エンジン停止後、各検出端面を拭きとることで検出器動作を回復した。

なおプローブ検出端の形状は、測定対象の装着場所、方法により変わるが、その例として上述した(1)、(2)に用いたプローブ、及びその他の目的で製作したプローブの検出端の外観を図 65 に示す。また本検出器の光センサーとしての全体性能を表11に示す。

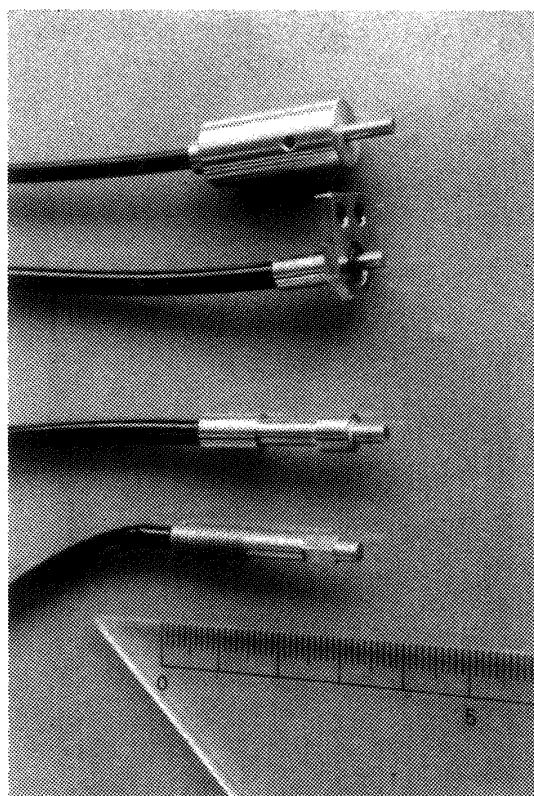


図 65 検出端の形状

6. 高温用冷却アダプタの試作

5.で製作した動翼先端検出器の使用可能温度は、3.1-(4)で述べたようにプローブ検出端面の光ファイバ素線を充填固定する接着剤の溶出温度で決まり、耐高温用接着剤で 400℃が限度と言われている。筆者等は動翼先端検出器をガスタービン動翼などの振動測定に用いるため、プローブの検出端部分を噴出空気流で覆う構造の冷却アダプタを試作した。ここでは冷却アダプタの構造と、冷却効率などを測定した結果及び FJR710 に装着した結果について述べる。

6.1 プローブ冷却アダプタの試作

耐高温性能を測定するため、図 66 に示すようなプローブ冷却アダプタと、アダプタに挿入する動翼先端検出器のプローブと同一形状のものに、検出端温度を測定するため熱電対を埋め込んだ温度測定用プローブを試作した。プローブ冷却アダプタは冷却空気吹出口径の大きいⅠ型(8φ)とⅡ型(4φ)の2種類(外形寸法は同一)を試作した。冷却空気は図 66 にて上部の冷却空気接栓より注入し、プローブの先端部すきまから噴出して検出端を覆っている。温度測定用プローブは冷却アダプタに内接する形状

表 11 光センサとしての特性

光センサとしての特性		最適検出距離 検出角度 反射体表面 応答性	検出端より 0.5 ~ 5 [mm] センサと反射体の相対角度 0 ~ 15° 金属表面(鉄, アルミなど) 4 ~ 12 [MHz] (帯域) 90 ~ 28 [ns] (立ち上り 10% → 90%の時間)
構造	全体	長さ 直径 最小曲げ 光ファイバ保護構造 耐温度	10 [m] 2 ~ 3.5 φ 30 φ 以上 螺旋管+ビニール外皮(又は金属シース外皮) ビニール外皮(80℃), 金属シース外皮(400℃)
	検出端	長さ 直径 構造 耐温度	15 [mm] 以上 バンドル径の 1.5 ~ 2 倍 金属管 200 [°C] 又は 400 [°C]

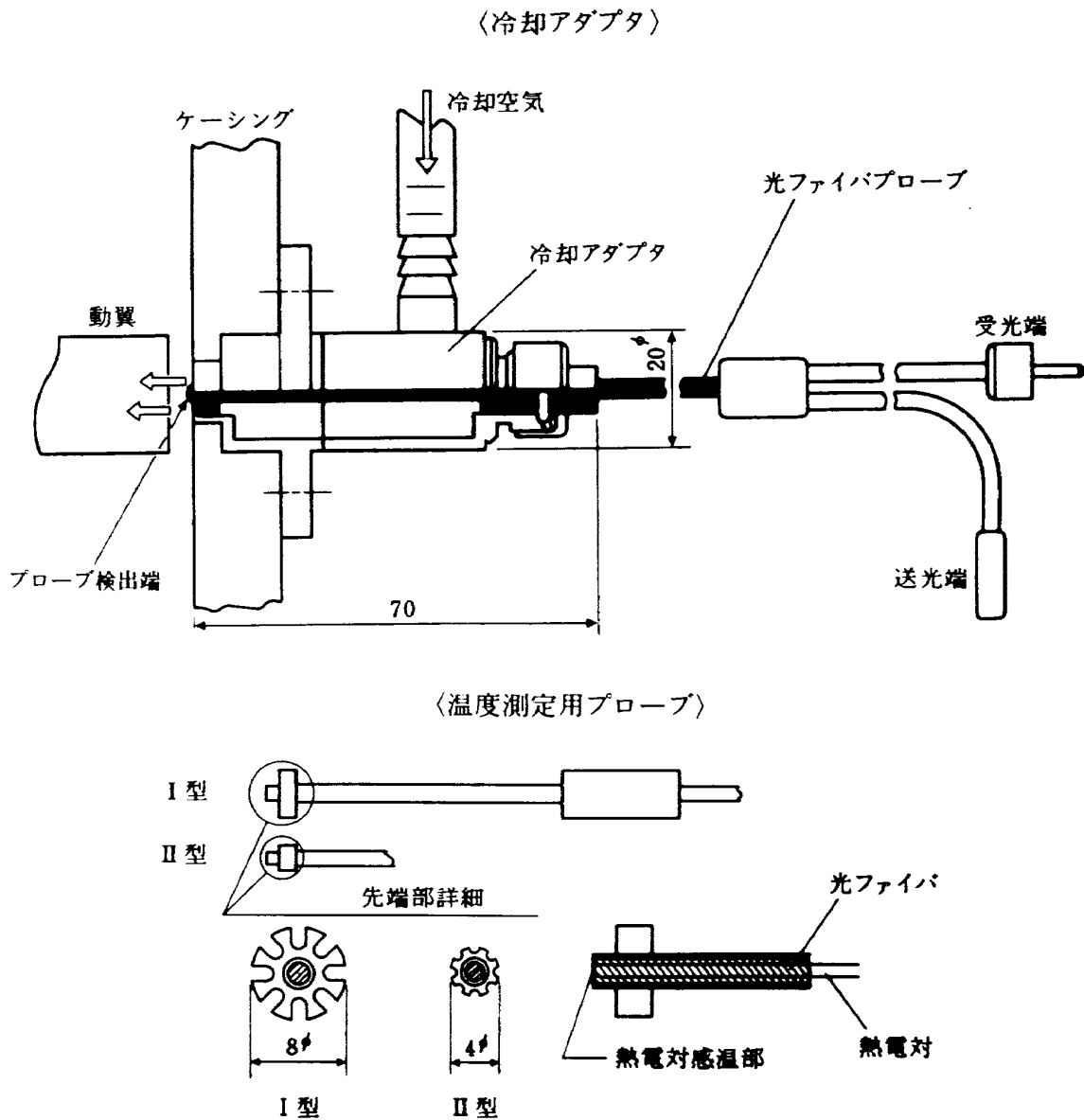


図 66 プローブ冷却アダプタと温度測定用プローブ

で、プローブ内は光ファイバ素線の充填中に 0.3ϕ の極細線熱電対を挿入してある。熱電対感温部は検出端面に位置している。冷却空気には小型コンプレッサを用い、加圧圧力は $0.5 \sim 1.5 \text{ kg/cm}^2$ である。図 67 に加圧圧力の変化に対する空気流量を測定した結果を示す。

次に冷却アダプタの冷却性能を測定するために、図 68 に示す当所原動機部の缶型燃焼試験設備の出口にノズルを装着し、流速 200 m/s 、温度 900°C までの燃焼ガスを得て測定実験を行なった。図 69 にノズル出口に装着した冷却アダプタを示す。図 69 にて、ガス温度はノズル出口に装着した 3 点櫛型熱電対で測定した。また流速はノズル出口に装着したピトー管と、当設備に設置されているオリフィスの測

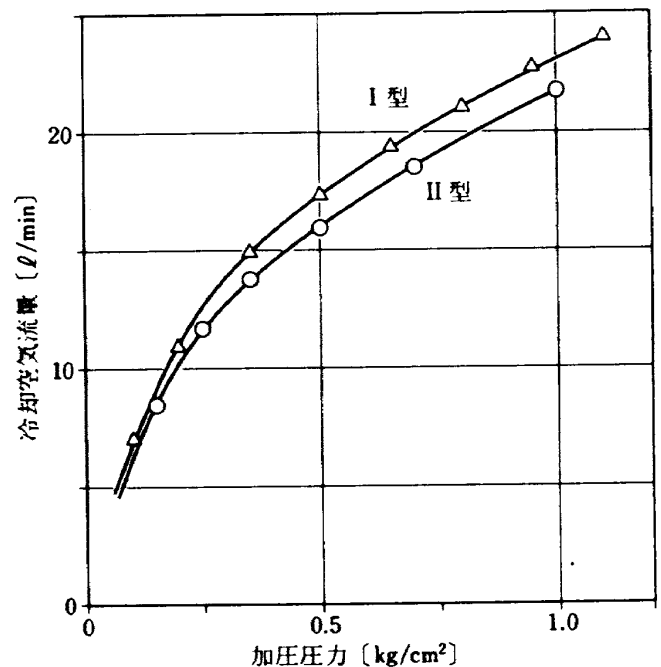


図 67 冷却空気流量測定結果

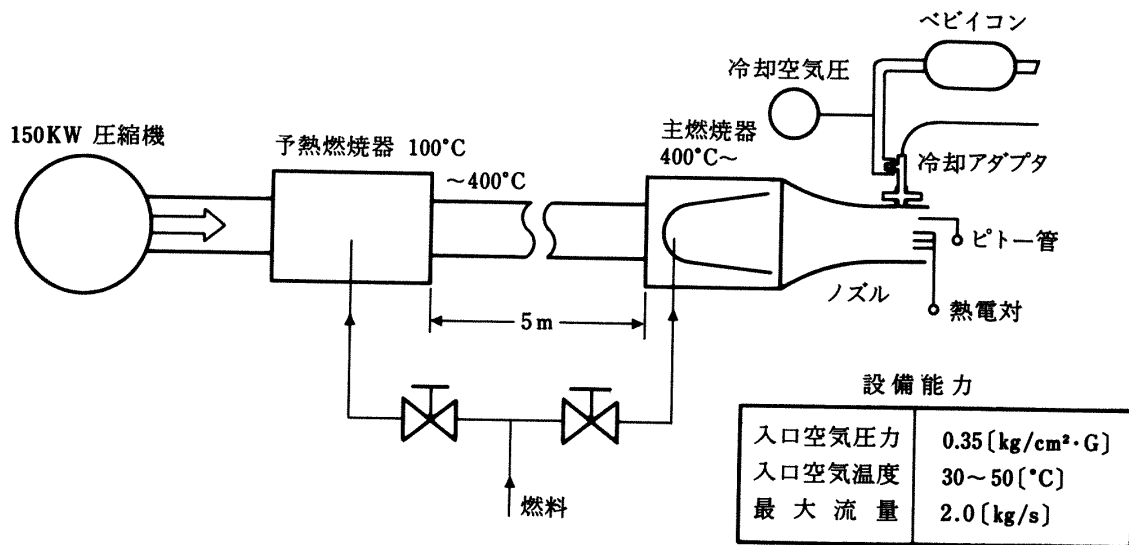


図 68 缶型燃焼試験設備

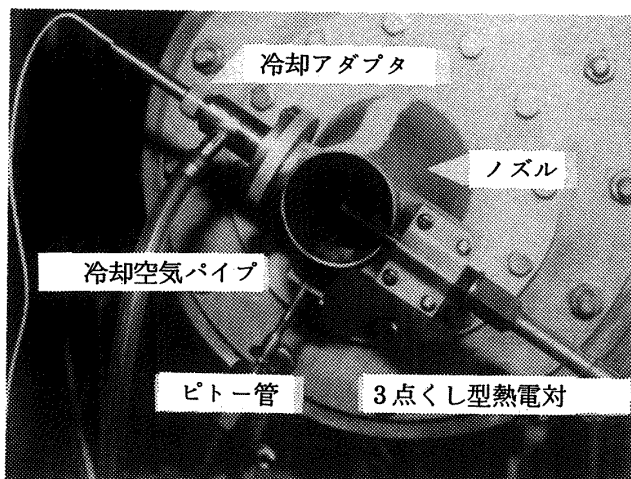


図 69 缶型燃焼試験設備に装着した冷却アダプタ

定値より求めた。各温度圧力は、温度スキナ、圧力変換器とマイコンにより自動連続測定を行なった。

測定実験はノズル出口流速 $U_e = 100 \sim 200 \text{ m/s}$ 、温度 $T_e = 200 \sim 900^\circ\text{C}$ 、また冷却アダプタの冷却空気温度 $T_c = 29^\circ\text{C}$ 、加圧圧力 $P_{VC} = 1 \sim 1.5 \text{ kg/cm}^2$ の条件で行ない、プローブ検出端面の温度 T_s を測定した。測定結果はプローブ先端直径 D (5mm) を代表長さとするノズル出口流束のレイノルズ数 R_e に対するプローブの冷却効率 η_s で表わした。ここに R_e 、 η_s は次式で表わせる。

$$R_e = U_e \cdot D / \nu_e \quad (38)$$

$$\eta_s = (T_e - T_s) / (T_e - T_c) \quad (39)$$

ここに ν_e はノズル出口ガスの動粘性係数である。以上より得られた結果を図 70 に示す。ここで横軸に

は R_e を、縦軸には η_s をとった。図 70 で冷却アダプタ I 型は□, ○, △, II 型は■, ●, ▲ ($P_{VC} = 1.5, 1, 0.5 \text{ kg/cm}^2$) で示した。また $U_e = 200 \text{ m/s}$ 付近での T_e に対する T_s の測定値を図 71 に示す。

ここで実際のガスタービンでの条件を考慮すると、例として FJR710 の低圧タービン入口、出口点では、温度範囲約 $400 \sim 1000^\circ\text{C}$ 、流速範囲約 $250 \sim 1300 \text{ m/s}$ 、これより $R_e \div 2.7 \times 10^4 \sim 3.5 \times 10^4$ である。これに対して冷却アダプタの冷却空気の条件、 $T_c = 29^\circ\text{C}$ 、 $P_{VC} = 1 \text{ kg/cm}^2$ とすれば、 $\eta_s = 0.87$ (I 型)、 $\eta_s = 0.73$ (II 型) と求められ、 $T_s = 80 \sim 160^\circ\text{C}$ (I 型)、 $T_s = 130 \sim 300^\circ\text{C}$ (II 型) と予想できる。従って試作した冷却アダプタの冷却性能は充分であると言える。

6.2 実機装着型冷却アダプタ

6.1 で試作した冷却アダプタの結果をもとに、形状を FJR710 のタービン出口位置に装着可能な形とした実機装着型冷却アダプタ (以降冷却アダプタと言う) を試作し、冷却アダプタ内に光ファイバプローブを挿入して、実機運転によるプローブの性能劣化を確認した。試作した冷却アダプタと光ファイバプローブを図 72 に示す。装着場所は、実機の温度計測用ボス (取付座, 10^ϕ) 3 カ所、パッキンを介し締付ナットで固定した。装着状況を図 73 に、エンジンのエグゾースト内側から見た検出端の様子

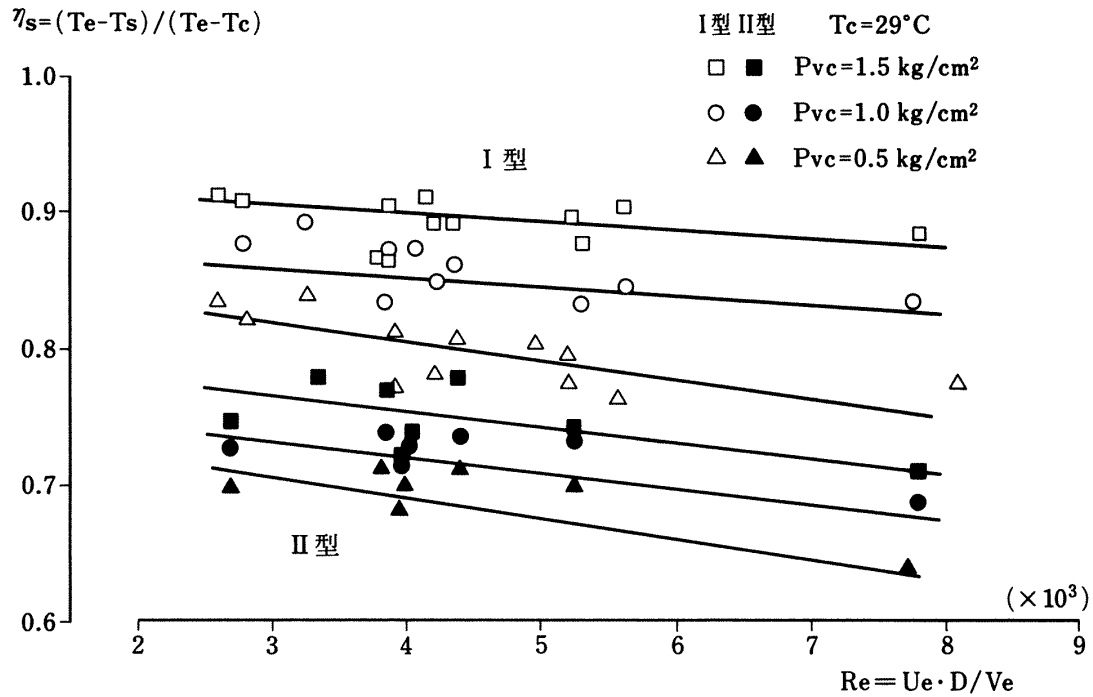


図 70 冷却アダプタの性能計測結果 (1)

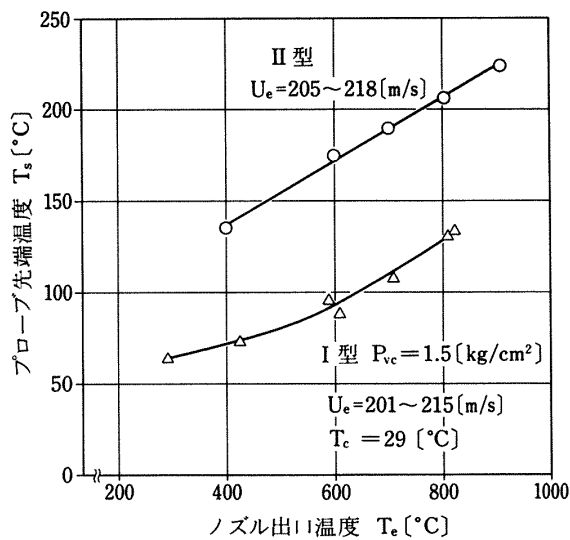


図 71 冷却アダプタの性能計測結果 (2)

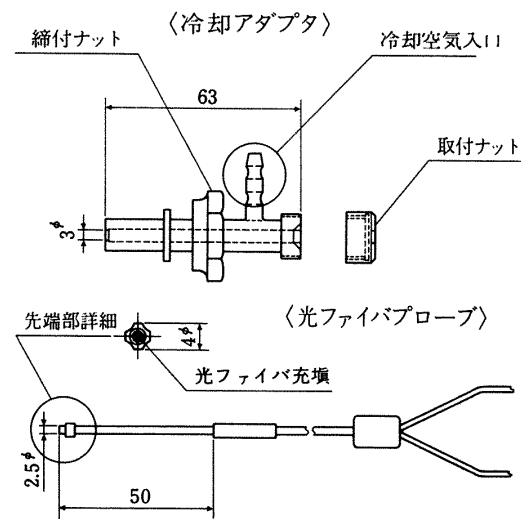


図 72 実機装置型冷却アダプタと光ファイバプローブ

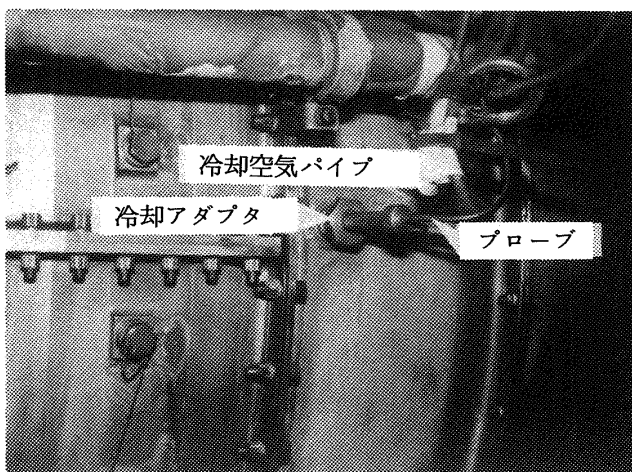


図 73 実機装置型冷却アダプタの装着 (FJR710)

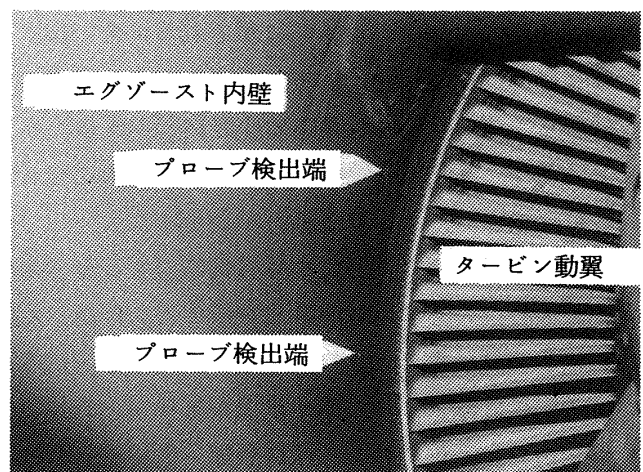


図 74 エグゾースト内壁から見たプローブ検出端

を図 74 に示す。

実験は冷却空気条件を $T_c = 10^\circ\text{C}$, $P_{vc} = 2\text{kg/cm}^2$ として、エンジンの運転を断続的に計 15 時間程度行なった。この場合プローブ装着位置の温度は $400 \sim 600^\circ\text{C}$ であった。プローブの性能劣化は 3 本のプローブの実験前と実験後の出力特性を比較して求めた。その結果、出力低下は約 4 % とほぼ満足な値であった。図 75 に実験後の冷却アダプタと光ファイバプローブを示す。

7. ま と め

光ファイバを用いて回転動翼の振動を非接触に検出するセンサを新しく開発し、これを用いて実機の動翼振動測定が可能であることを示した。このようなセンサを考察する場合、光ファイバの特性だけでなく、光源、受光素子の選択、結合方法及び実機計測上の経済性と扱い易さなどが総合的に考慮されなければならない。本報告ではまずこのようなセンサが十分な出力を得ることが可能であるか、との観点より各点での損失を測定し、光源光の強さ、受光素子感度の必要な値を求めた。これより実用上考えられる長さ、直径を持つ光ファイバプローブを試作し、出力値を求めた。これによればセンサ各点での損失の合計は非常に大きく、出力値は非常に小さくなるが、本検出器の応用例のようにケーシング内に検出端を挿入する場合には、ノイズに相当する自然光のセンサへの入射がほとんど無く、S/N 比を高くとれる為、充分実用が可能である。

次に本検出器の誤差について、誤差を生ずる原因を分類し検討した結果、センサ出力値をなるべく大きくとること、誤差が定常的に現われる場合には本動翼振動計測法でこれを除去できること、動翼振動に伴って生じる誤差はかなり小さいが、大きく振動して動翼と検出器の相対角度が 10 度以上になる場合には誤差は大きくなることがわかった。

本検出器を用いて実機の動翼回転に対するセンサ出力を求め、十分な出力が得られることを確認した。これは空力試験機 F30, FJR710 のファン動翼についての実験計測で、この他に動翼の形状が小さく計測が難しいと思われる圧縮機動翼、低圧タービン動翼についても、引続き振動計測実験を予定してい

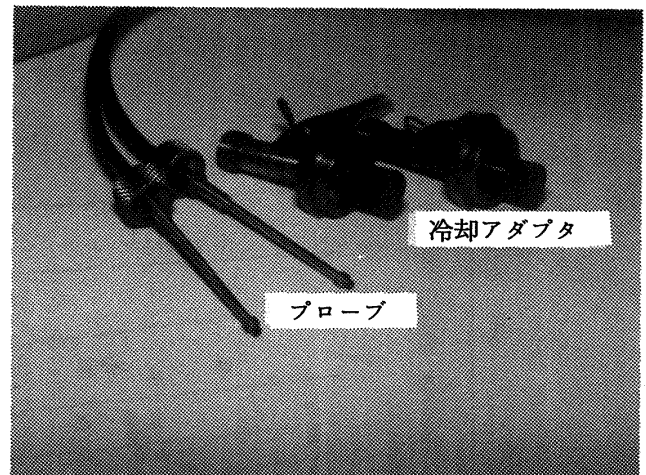


図 75 冷却アダプタと光ファイバプローブ
(FJR710 装着実験後)

る。これ等の実験計測実施中に、油が飛散してプローブの検出端面が汚れ、計測が不可能になった例があった。このように光の入出射部分が覆われてしまう障害は、光を応用するセンサでは致命的であり、実用上常に問題となる点である。従って常にその虞れがある場合には、検出端面を何等かの方法で保護する構造が必要であろう。

本検出器の使用可能温度は、検出端にて 400°C 以下である。そこで検出器先端部全体を空気の噴出流で覆う冷却アダプタを試作し、FJR710 の排気ダクト壁に装着して耐高温試験を行なった。その結果ガス流の温度が 800°C で、検出端温度を 200°C 以下に冷却できることを確認した。

おわりに本検出器を用いた動翼振動計測では、従来のひずみゲージによる方法に比べ、非接触計測の有利性、同時に全動翼の振動計測が可能である点など、今まで得られなかった成果を上げることができた。これについては別の報告で述べた。¹⁰⁾

なお本研究は通産省工業技術院が実施する、「ムーンライト計画」のもとで行なったものである。本研究を行なうにあたり、多くの方々に協力を得た。特に実機の運転において、航空機公害第 2 研究グループ、原動機部原動機性能研究室及び燃焼研究室の方々に多大な協力を得たことを記し、ここで感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 遠藤, 松田, 松木「回転翼振動の非接触計測法の研究(第Ⅰ報)」, 第23回自動制御連合講演会(昭和55年11月)
- 2) 松田, ほか「第Ⅱ報(動翼先端検出器の研究)」, 機械学会講演論文集, No.810-6
- 3) 遠藤, ほか「第Ⅲ報(ファン動翼振動の計測)」, 第9回ガスタービン定期講演会論文集, ('81-6)
- 4) 遠藤, ほか「第Ⅳ報(ソフトウェア及び計測例)」, 航空宇宙学会原動機講演会前刷, ('82-2)
- 5) 計測自動制御学会「光応用計測の基礎, 第2章」
- 6) 住田光学硝子(株)「光ファイバーについて, 技術資料」
- 7) 遠藤, 松田, 松木ほか, TM-471「ファン動翼振動計測装置の試作」
- 8) 森田, 関根, 中山, 吉田, ほか, TM-497「FJR710 ファンジェットエンジンの横風試験」
- 9) 森田, 関根, 中山, 吉田, ほか, TM-496「FJR710 ファンジェットエンジンのインレットディストーション試験Ⅱ」
- 10) M. Endoh, Y. Matsuda, M. Matsuki「Noncontact Measurement of Rotating Blade Vibrations」, '83 東京国際ガスタービン会議前刷('83-10)

付 録 光ファイバ諸特性の測定方法

1) 特性測定用光源

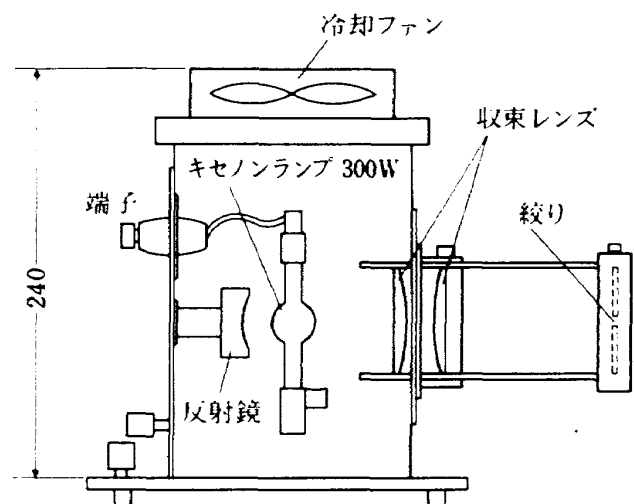
本報告で光ファイバの諸特性を測定するために, 放射光束の軸方向パワー密度が半径方向で均一になることを目的として, 付図1に示すようなキセノンランプによる光源を製作した。ここでキセノンランプの放射光を反射鏡, 収束レンズ, 絞りをを用いてビーム状光束を得ている。出力光の測定は光パワーメータのオプティカルヘッドに, 一定の口径の穴をあけた円板を付着して行なった。光パワーメータの性能を付表1に示す。

2) 入射特性の測定

上述した光源を用い, 光ファイバの入射特性を測定した。供試光ファイバ(バンドルファイバ)は光源の絞りに近接して光源の光束軸とバンドルファイバの中心軸を一致させて置き, バンドルファイバ受光面を光束軸に対して種々の角度に設定し, 設定角に対する光源入射量を測定した。

3) 放射分布特性の測定

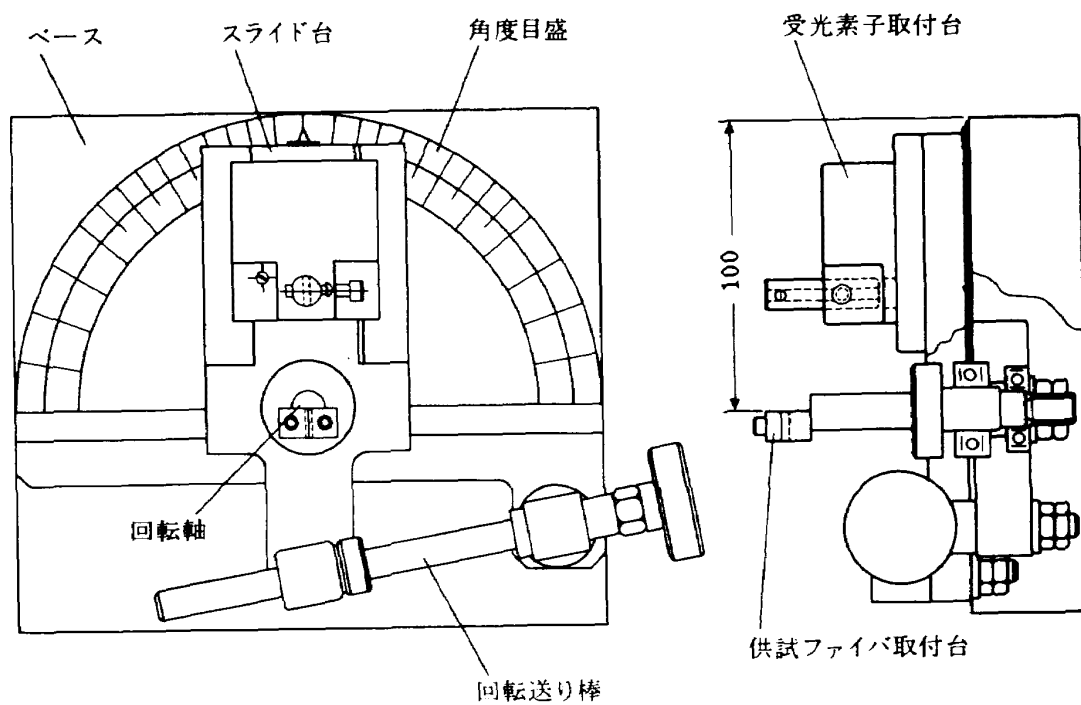
光ファイバの放射分布特性を測定するために, 付図2に示すような測定治具を製作した。図で受光素子取付台はスライド台上を移動させることが可能で, スライド台は回転軸を中心に回転送り棒により回転する。測定では静止回転軸に固定した供試光ファイバ取付台に, バンドルファイバの放射端を中心軸と一致させて固定し, スライド台を回転させ角度目盛で測定角度を設定して, その角度での受光素子出力を測定した。



付図1 光ファイバ特性測定用光源

付表 1 光パワーメータの性能仕様

測定範囲	10 nW ~ 10 mW (-50 dBm ~ 10 dBm)
波長範囲	450 nm ~ 950 nm (平坦特性域)
精 度	メータ目盛読み取り 3 ~ 5 % 又は 0.2 ~ 0.5 dB
確 度	$\pm 5 \% (\lambda = 6328 \text{ \AA} \text{ にて})$
セ ン サ	シリコンホトダイオード
受光面積	1 cm ² (11.3 ϕ)
表 示	ワット及び dBm をメータ表示
寸法・重量	100 (H) \times 210 (W) \times 200 (D) 3 kg



付図 2 放射特性測定治具

航空宇宙技術研究所資料 535号

昭和59年7月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺町1880
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社 東京プレス
東京都板橋区桜川2-27-12
