

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-923

光ファイバピックアップアップ式タービンフローメータ

松田幸雄・遠藤征紀

1987年2月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. はじめに	1
2. タービンフローメータ	1
2.1 タービンフローメータの測定原理	1
2.2 タービンフローメータの回転数ピックアップ	2
3. 光ファイバピックアップ	3
3.1 反射型光ファイバセンサと構成方法	3
3.2 光ファイバピックアップ	5
4. 光ファイバピックアップ式タービンフローメータ	6
4.1 光ファイバピックアップ式タービンフローメータの構成	6
4.2 光ファイバピックアップ式タービンフローメータの特性測定	7
5. 光ファイバピックアップ式タービンフローメータによる流量計測	10
6. まとめ	12

光ファイバピックアップ式タービンフローメータ*

松田幸雄** 遠藤征紀**

Turbine Flow Meter with Optical Fiber Pick-up

By

Yukio MATSUDA, Masanori ENDOH

ABSTRACT

For measurement of the flow rate of liquid and gas, a turbine flow meter is widely used for its easy handling characteristics and high reliability. We however, often face, the problems of narrow covering range and electric noise. These problems are mainly caused by the electro magnetic pick-up.

An optical fiber pick-up turbine flow meter (OTF) has been developed to resolve these problems by using an optical fiber pick-up instead of the conventional electro magnetic pick-up to detect the passage of turbine blades. The OTF output signal is a pulse train with a constant amplitude (1V peak) in all ranges covered. An eminent improvement of linearity is realized in the lower flow rate range. Various kinds of aero-engine start and performance tests have proved the OTF to be very useful.

1. はじめに

光ファイバを応用したセンサ・計測法は光ファイバの特徴と光応用計測が本質的に持つ非接触計測である事を併せ持つことにより、最近急速に開発、実用化が進んでいる。筆者らは既に、ガスタービンの回転動翼の非接触振動計測¹⁾に必要な動翼先端の通過を検出する光ファイバセンサを開発した。これは光学ガラスの光ファイバ素線を数百本、直径1~2mmの束にした反射型光ファイバセンサで、光源、光/電圧変換素子も含めてセンサの特性、使用方法等を明らかにすることができた²⁾。

筆者らは、今回この光ファイバセンサをガスタービンの燃料流量測定に使用されるタービンフローメ

ータ(以下TFMとする)に適用する事により、従来のTFMで問題となっていた低流量測定域の測定限界の改善を試みた。その結果試作したTFMは従来のTFMに比べ流量測定範囲、出力信号の信号対雑音比(SNR)の著しい向上が得られ、これを実機の燃料流量計測に用いた結果実用上有益な事を確認できた。本報告はこの光ファイバセンサを適用したTFMについて述べる³⁾⁴⁾。

2. タービンフローメータ(TFM)

2.1 タービンフローメータの測定原理

TFMは羽根車式流量計の一種で、図1に示すように被測定流体が流れる管中に羽根車(軸流タービン、以下単にタービンと書く)を入れ、流体の運動量によりタービンを回転させ、その回転速度から瞬時流量を測定するものである。ここでタービンの回

* 昭和61年11月27日受付

** 原動機部

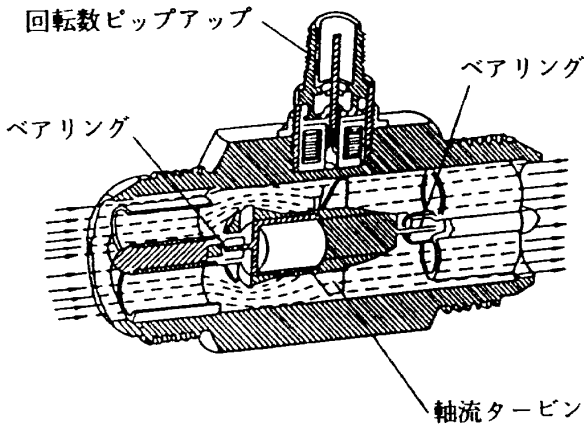


図1 タービフローメータ

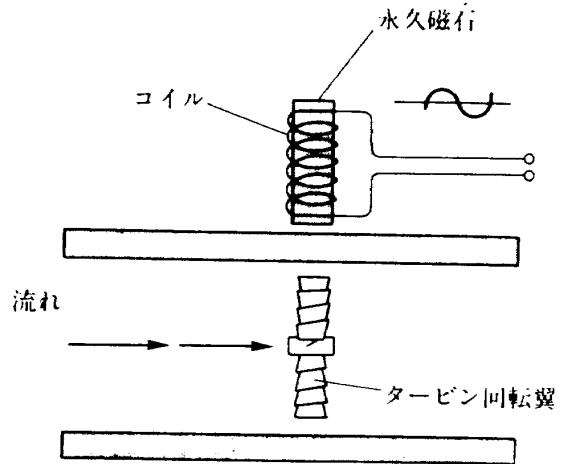


図2 電磁式ピックアップ

転翼の周速 $v \cdot r$ とタービンを通過する流体の速度 u との関係は次のようになる。

$$v \cdot r = u \cdot \tan \theta \quad (1)$$

ここに v : タービン回転翼の回転速度, θ : 半径 r の位置において回転翼が流体となす角度, である。タービン回転翼の回転速度は, 流体の運動量による駆動トルクと回転軸受の摩擦による負荷トルク T_m が平衡した状態で一定となり, 実際の v と流体の体積流量 Q との関係は次のようになる⁵⁾。

$$\frac{v}{Q} = \frac{\tan \theta}{r_m \cdot A} - K \frac{T}{r_m^2 \cdot \rho \cdot Q^2} \quad (2)$$

ここに r_m : タービン回転翼の平均回転半径, A : 流路面積, ρ : 流体の密度, K : 定数である。このように, TFMは軸受の摩擦及び流体とタービン回転翼との摩擦の割合が大きくなる微小流速以上の測定範囲では, v は Q にほぼ比例する。

TFMの特長は構造が簡単で堅牢, 小型であり, 測定精度は $\pm 0.1 \sim 0.25\%$ 程度である。TFMは主にガスタービンエンジンの燃料流量, 低粘度油の流量測定などに用いられている。また液体水素, 窒素, 酸素及び気体の流量測定用のものもある。

2.2 TFMの回転数ピックアップ

TFMの流量測定信号は, タービンの回転数を検出することで得られ, 回転数検出器(回転数ピックアップ)には, 通常電磁式ピックアップが用いられる。これは永久磁石を芯としたコイルによるピック

アップで, 図2に示すようにタービンの回転翼の通過に伴い, 電磁誘導によりコイルに正弦波状の誘起電圧が生じることを利用している。電磁ピックアップは, 小型堅牢, 無電源(パッシブタイプ)であることから, 一般の回転数センサ, トルク検出用等に広く用いられているが, TFMに適用した場合次のような問題を生じる。

- 1) 出力信号は電磁誘導によるため, 低流量域では電圧振幅が数mVとなり, また波形自体も歪が生じて来るため出力信号のSNRが悪くなる。
- 2) ピックアップ自体に永久磁石を用いているためタービン動翼に対して磁気吸引力を及ぼし, これが低流量域では回転力に対し相対的に大きくなり, その結果回転が妨げられるため回転数は流量に比例しなくなる。

以上のように電磁ピックアップ式のTFMは低流量域での測定が難しく, 測定レンジ(v と Q が比例する測定量範囲)は10:1(測定最大流量の比)程度である。また電磁ノイズが多い環境下での使用では, 測定レンジ内でも測定が不可能になることがある。従ってこの様な場合では低流量測定用の小口径TFMを併用するが, 流路の切り換えが必要になり, また後に述べるように口径が測定流路より小さくなることによる不具合が生じることがある。また電磁ピックアップは本質的に電磁誘導を受けやすい構造であるため, 測定待機状態のようにタービンロータが停止している場合には, 主に商用電源からのノイズを拾いやすくなる。このため, 実際の測定ではある程度タービンロータが回転してから測定を行なうな

どかなり面倒な取扱いが必要である。

電磁ピックアップに対して変調キャリア方式のピックアップがある。これは通常の金属を芯にしたコイルに数十kHzのキャリア信号を加え、これがタービンの回転翼の通過にともない振幅変調されることを利用している。この変調キャリア方式では電磁ピックアップのような問題は無く、測定レンジは100:1程度である。しかしピックアップ本体(コイル)の他に、一定周波数のキャリア信号源及び振幅変調信号から回転数信号を得る復調回路が必要である。これ等は1つの筐体内に内蔵されるが形状はかなり大きく、またピックアップに近接して置くことが必要である。

筆者らはTFMのピックアップに光ファイバセンサを用いることにより、上に述べた問題を全て解決することができた。本報告ではこの光ファイバセンサによる光ファイバピックアップと、これを適用したTFMについて述べる。

3. 光ファイバピックアップ

3.1 反射型光ファイバセンサと構成方法

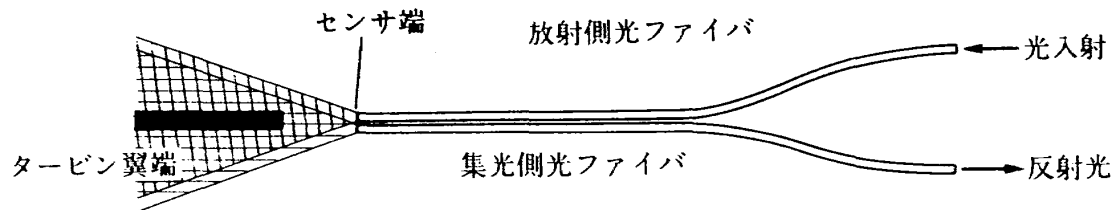
光ファイバピックアップに用いた光ファイバセンサは反射型光ファイバセンサ(以下単にセンサとする)と呼ばれるもので、センサの前面にある物体の有無、通過などを光学的に検出する。これはセンサ

端から放射する光束中に物体がある場合、これによる光反射を同じセンサ端で集光してセンサ出力とするもので、原理的には図3に示すように2本の光ファイバでこれを行なう。実際にセンサを製作する場合には、単芯の太い光ファイバでは柔軟性にかけ、また細い光ファイバでは放射及び集光光量が少ないため、直径が数十 μm の光ファイバ素線を数百本束ねてバンドルファイバとし、センサを構成する場合が多い。この場合センサ端での光ファイバ素線の束ねかた(バンドル方法と言う事にする)により、センサの特性を図4に示すように変えることができる。TFMでは検出対象がタービン回転翼の翼端であり、この場合翼端とセンサ端の距離が小さく変化が少ないこと、翼端の反射面積が小さくても比較的出力が得られること、センサの製作が比較的容易であること、などからバンドル方法にランダム型を選択した。

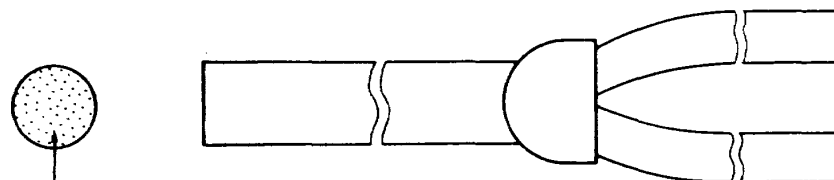
一方TFMに光ファイバセンサを適用するには、図5に示すように二種類の方法がある。これは、

- 1) 光ファイバセンサのみをTFMに組み込み、発光、受光素子を内蔵したユニットをTFM本体から離れた計測室内に設置し、この間を光ファイバで結合する。
- 2) 光ファイバセンサ、発光、受光素子をTFM本体と一体化する。

ここで1)の方法は構成が簡単であるが、光ファイ



放射側光ファイバと集光側光ファイバをセンサ端に配置する。



数十 μm の光ファイバを、数百本以上束ねる。

→バンドル方法

ランダム型 (R)

同軸型 (C)

半円型 (H)

図3 反射型光ファイバセンサ

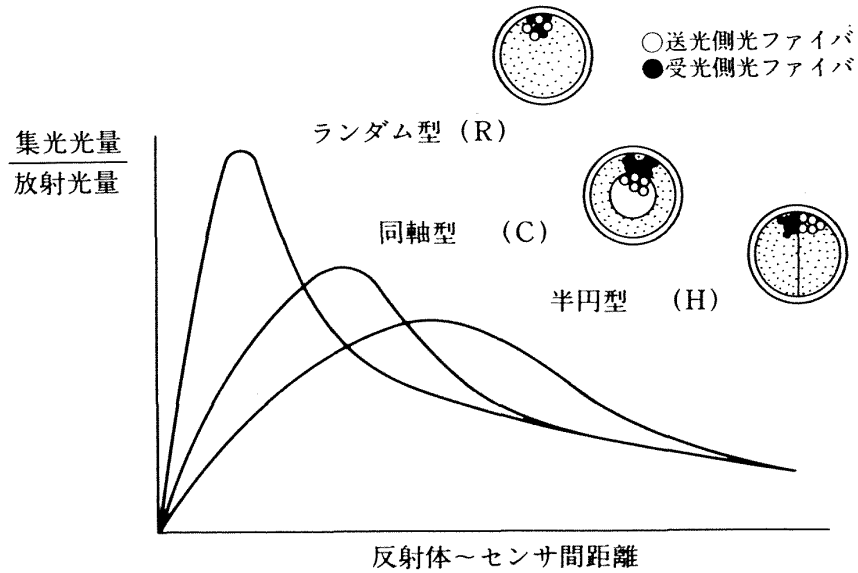


図4 光ファイバセンサの特性

バセンサと発光，受光素子を結合する光ファイバが必要であり，その伝送損失，光コネクタでの結合損失がかなり大きくなるため，TFMと発光，受光素子間の距離を延ばすには石英ファイバを採用し，また発光素子も高出力のものが要求される。従ってこの構成方法はTFMの周囲環境が厳しく，発光，受光素子の耐環境性（半導体製品である）が不十分である場合，防曝型を要求される場合等に限って採用するのが適切である。2)の方法は1)に比べやや複雑な構成になるが，TFMへの配線が従来のTFMと同様に電気配線のみであるため，取扱いが容易で全体の費用も少なく済む。

筆者等はまず1)の方法について試作，動作確認

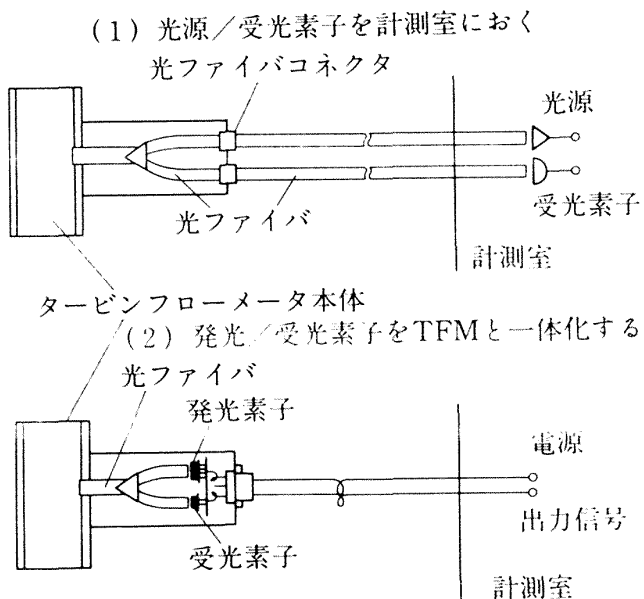


図5 光ファイバピックアップの構成方法

試験を行なった（なおここでは光ファイバコネクタは使用していない）。試作したTFMを図6，7に示す。ここでセンサには全長3mの反射型光ファイバセンサ（光学ガラス系光ファイバ素線使用，光フ

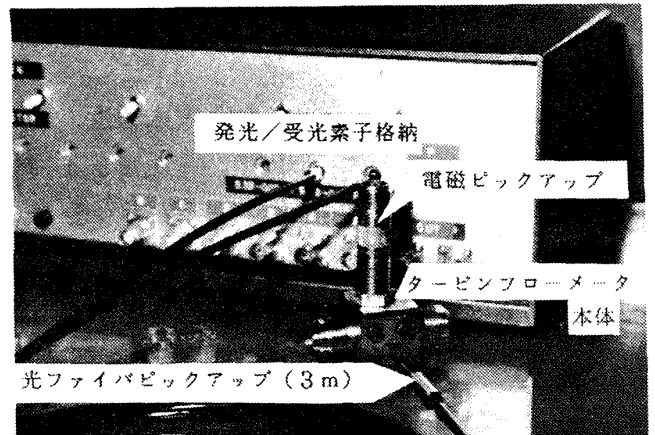


図6 光ファイバピックアップ式TFM (1)の構成方法による試作)

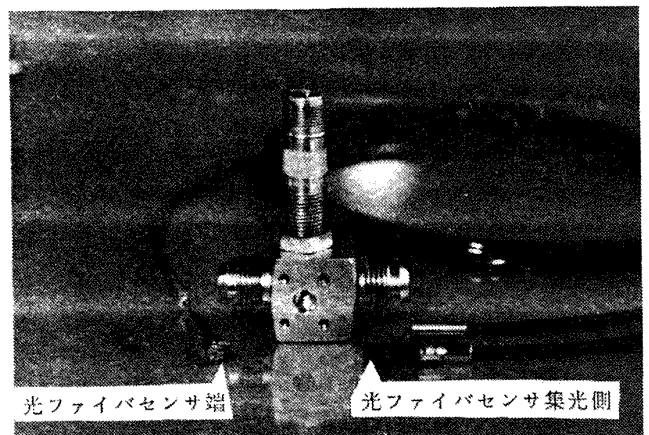


図7 光ファイバピックアップ式TFM (1)の構成方法による試作)

ファイバ束直径 1mm ランダム型) を用い、直接 TFM に取付け、従来の電磁ピックアップの信号と比較し動作を確認した。この動作試験結果によれば、タービンの回転翼の通過に対しパルス状の信号が得られ、その出力周波数はタービンが回転を停止するまで流量との比例関係を保つことが確認できた。しかしこの構成方法では、光伝送用の光ファイバでの伝送損失が存在し、その値は用いる光ファイバの材質で異なり、例えば 10m の光学ガラス系及び石英ファイバの場合は、それぞれ -3.98 dB ~ -5.23 dB 及び -0.22 dB (文献 2 より) になる。以上の結果より 1) の構成方法による光ファイバピックアップ式 TFM が実用可能であるとの結論を得た。

次に筆者等は、2) の構成方法の TFM について 1) と同様に試作を行なった。これは 1) の構成方法と比べ、特性上の違いは光ファイバ伝送損失の有無及び光コネクタでの接続損失だけであるから、以下 2) の構成方法の場合についてのみ述べる。

3.2 光ファイバピックアップ

光ファイバピックアップ (以下光ファイバ P/U とする) を TFM と一体化する場合、まずセンサ、発光素子、受光素子の取付け許容寸法、結合方法、機械的構造などからこれらを選択する必要がある。また十分な SNR を持って出力信号を得る必要があるが、このためには主に光ファイバセンサの特性が明らかでなければならない。以上の点については文献 2 で明らかにした光ファイバセンサの特性をもとに、光ファイバ P/U の試作、各素子の選択を行なった。図 8 に試作した光ファイバ P/U を構成する部品を示す。光ファイバ P/U の全長は 90mm、センサ端の光ファイバ束直径 $D = 1.2\text{mm}$ (バンドル方法はランダム

型) 光ファイバ素線にはクラッド直径 $30\mu\text{m}$ の光学ガラス系のものを使用した。また発光 / 受光素子はバンドルファイバと効率良く結合するために、発光 / 受光面がバンドルファイバの口径と同程度の広さを必要とする。これより発光素子には、発光面に球レンズを付着してビーム状の光束を得ている高指向性型 LED (最高出力 $10\text{mW}/150\text{mA}$ 、波長 730nm) を、また受光素子には、受光面が $2.5\phi\text{mm}$ の増幅器内蔵型 PIN フォトダイオード (光 / 電圧変換増幅率 $6 \times 10^4\text{V/W}$ 、単一波長 900nm にて) を採用した。

次に光ファイバ P/U の特性を図 9 に示す。特性測定には模擬反射体として幅 $a = 1.5\text{mm}$ の良く磨いた鉄表面と、これと比較のため理想的な反射体としての鏡面を用いた。これによれば、タービン回転翼端 (反射体表面) と光ファイバ P/U (流路壁面) との間隔が 0.5mm 程度であるから、特性上高い出力範囲の部分で使用できる。

次にタービン回転翼端の有効反射表面幅は非常に小さく、 $0.4 \sim 0.3\text{mm}$ 程度である。そこで反射表面幅 a に対する出力の減少傾向を、光ファイバ P/U と同じ形式で製作した D (反射体に対向するセンサ端の光ファイバ束直径) $= 2\text{mm}$ のセンサを用いて測定した。これを図 10 に示す。図 10 では a 、 d の値を D で規準化した数値を用いている。図 10 にて、反射体には $a = 0.5$ (△印)、 2.5 (□印)、 5mm (○印) である良く磨いた鉄表面を用いた。また横軸には図 9 と比較のため d/D を、縦軸には鏡面での出力を 1 とした出力比 E_0 を示した。図 10 より反射幅が $a/D = 1.25$ (図 9 と同条件) から $a/D = 0.25$ に減少した場合には、 $d/D = 0.125 \sim 0.75$ (光ファイバ P/U では $d = 0.15 \sim 0.9\text{mm}$) にて出力はほぼ 1/3 に減少する。

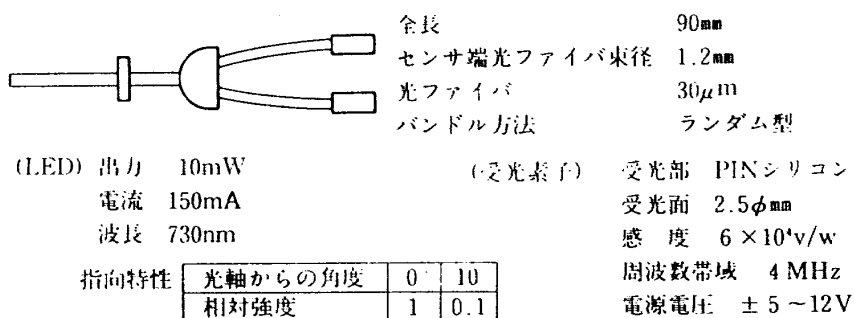


図 8 光ファイバピックアップの構成部品

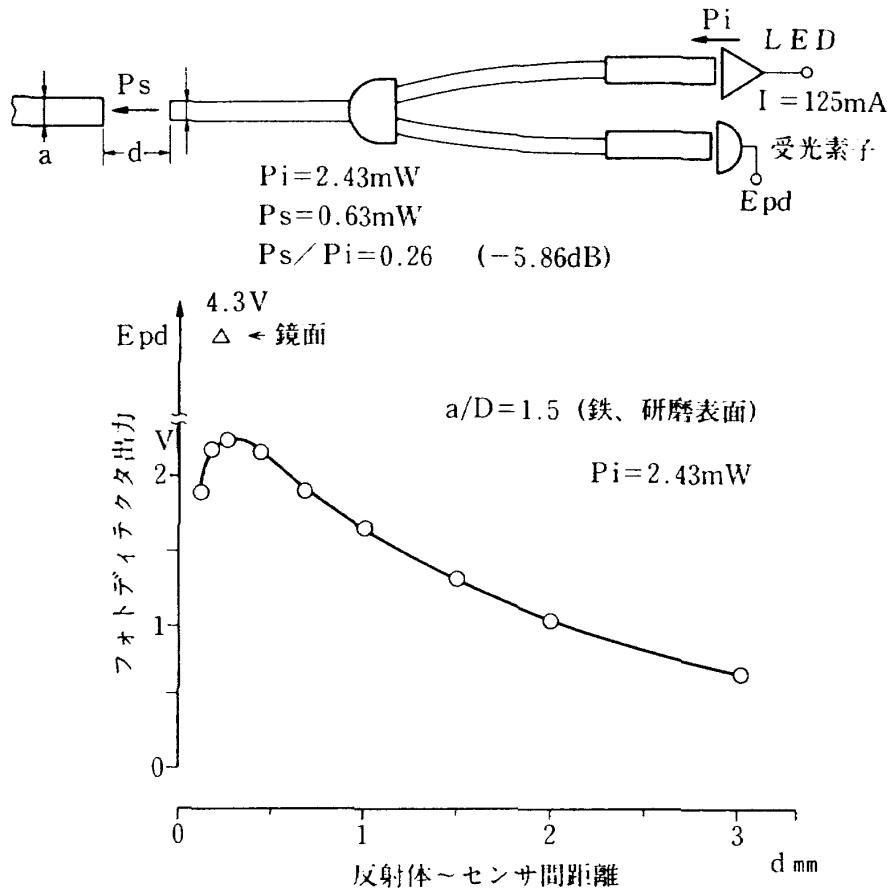


図9 光ファイバピックアップの特性

以上より光ファイバP/Uの出力電圧は、図9において $d = 0.4 \sim 0.3\text{mm}$ での出力電圧、 2.1V の $1/3$ 程度と推定できるが、これは出力信号として十分な振幅であろうと思われる。

4. 光ファイバピックアップ式TFM

4.1 光ファイバピックアップ式TFMの構成

以上述べた光ファイバセンサ、LED、受光素子をTFM本体に組み込んで、光ファイバピックアップ式TFM(以下光ファイバP/U式TFMとする)を試作した。図11にその構成をしめす。図に示すようにLED、受光素子はそれぞれの回路基板によってアルミ製のブロックに固定してある。一方センサはセンサ端をTFM本体にホルドで固定し、放射/集光側の端面はブロック内でLED、受光素子の前面と直接接触している。またブロック及びコネクタは2本の支柱でTFMと一体化してあり、全体を円筒状の金属ケースで覆う構造になっている。図12に光ファイバP/U式TFMの外観を、図13、14にそれぞれセンサと基板上的LED、受光素子を示す。

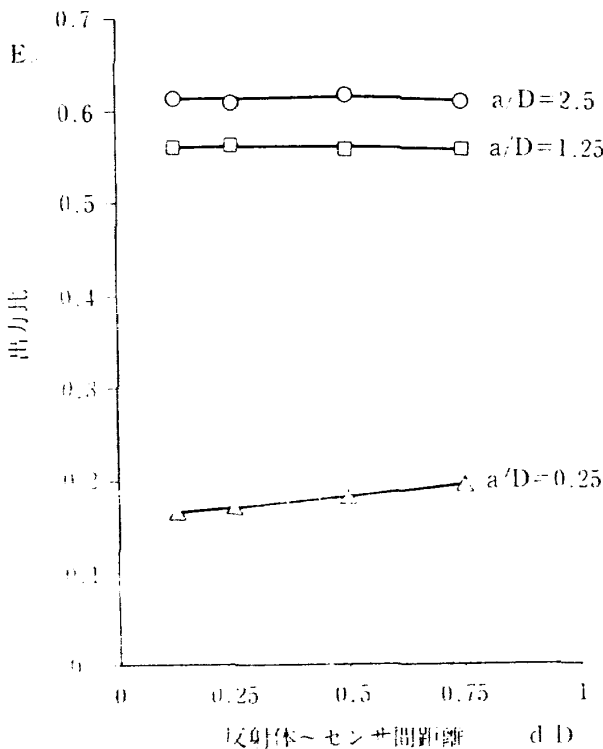


図10 反射体幅に対する出力減少特性

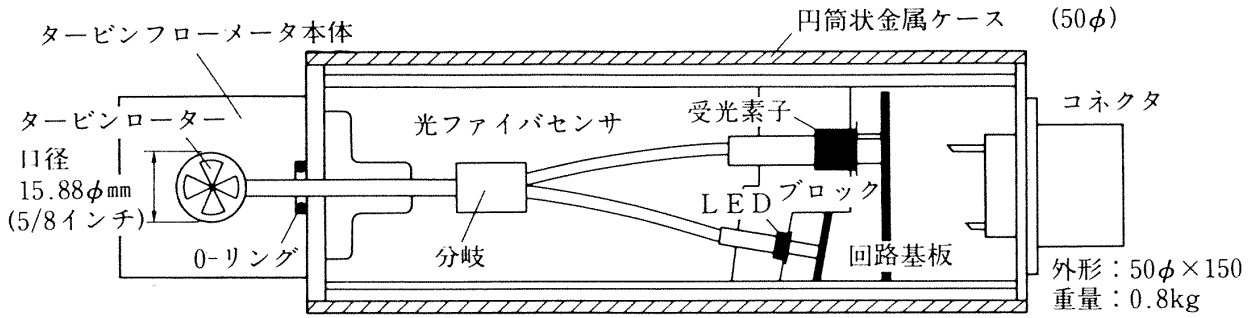


図11 光ファイバピックアップ式タービンフローメータの構成

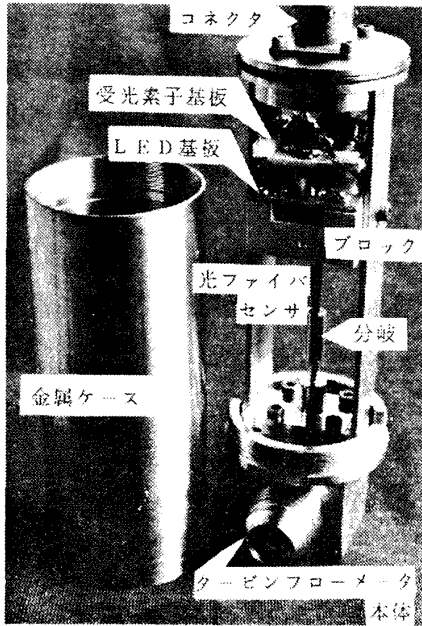


図12 光ファイバピックアップ式TFM

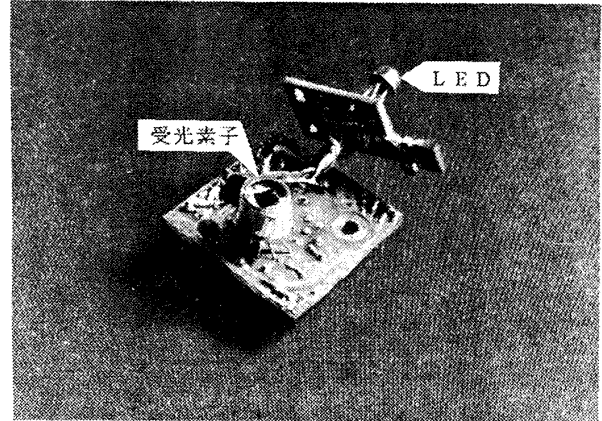


図14 LEDと受光素子

とを想定して、これに耐え得るよう図15に示すようにOリングによるシールを行なった。

次にタービン回転翼について、まず光反射が良好になるよう翼端を研磨した。しかしこの状態ではタービンロータなど翼端以外の部分からの反射光が多く、図16(1)に示すような出力信号波形となり、SNRは4 dB程度と非常に低かった。そこで翼端以外をサンドブラスト（金属表面の塗装下地、洗浄を目的として、細かい砂により表面あらさを $\pm 0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 程度に加工する表面処理法の一つ）により低反射面に加工して反射を押さえることにより、SNRを20 dBに改善することができた。図16(2)にその出力信号波形を示す。

試作した光ファイバP/U式TFMの大きさは約 $50 \phi\text{mm} \times 150\text{mm}$ 、重量は7.845 Nで従来のTFMに比べやや大きい、実際の取扱い上は特に差異は無い。またセンサ部分を小型にすることで全体寸法の縮小は容易である。

4.2 光ファイバP/U式TFMの特性測定

光ファイバP/U式TFMの測定流量に対する出力

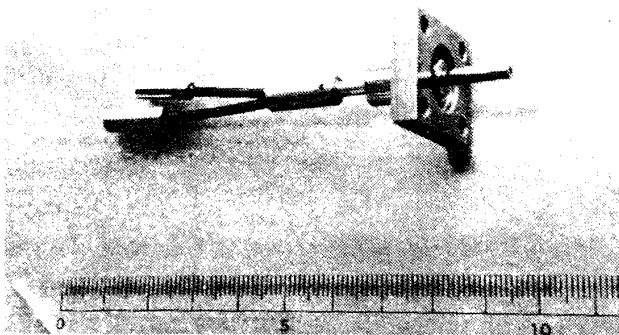


図13 光ファイバセンサ

試作したTFMは従来のTFMを改造して光ファイバP/Uを装着したものであり、口径 $16.8 \phi\text{mm}$ （ $5/8$ インチ）最大測定流量 1281kg/hr （ 5700PPH ）、タービン回転翼が4枚のジェット燃料流量測定用のものである。センサ装着面の加工では、測定流体の圧力が定常にて 3.43MPa （ 500PSI ）以下になるこ

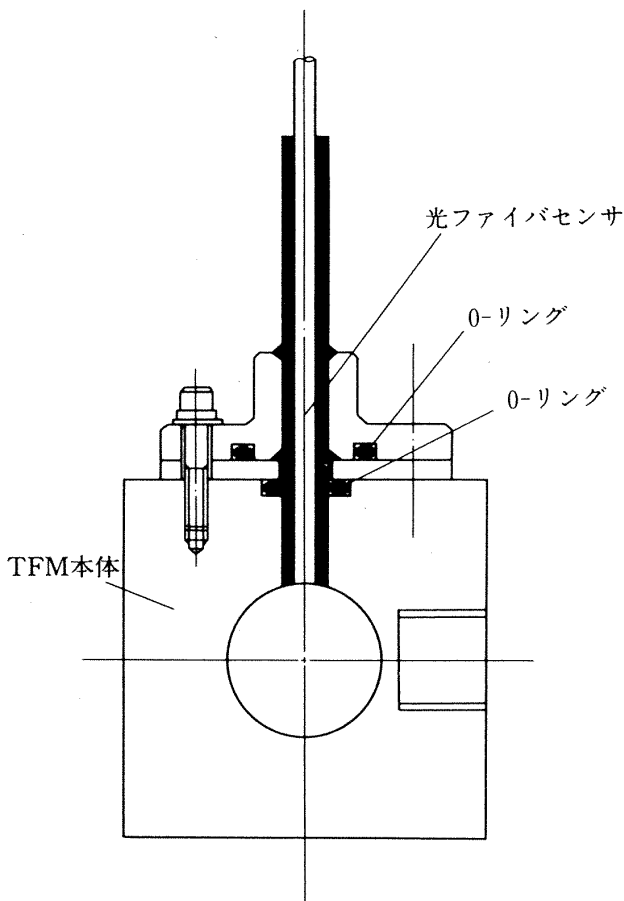
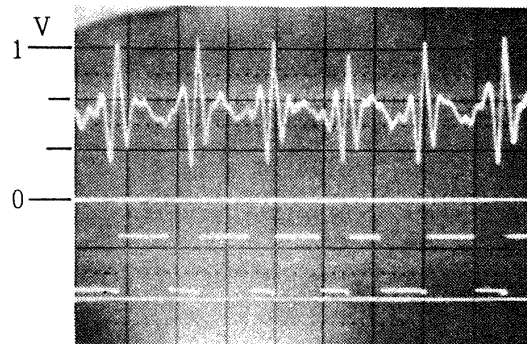
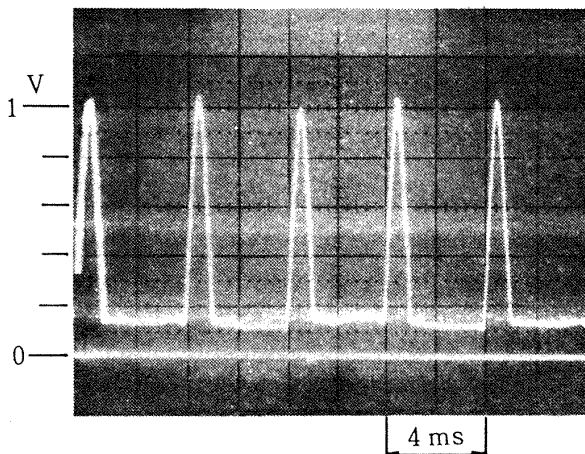


図15 O-リングによるシール

信号周波数をTFM標準校正装置にて測定した。これは米国NBS(National Bureau of Standards)標準でTFMの校正(流量対出力周波数を測定する)を行なう重量検定方式による校正装置で、図17に示すように一定重量の測定流体(ここではジェット燃料)をTFMに流し、その重量、時間、流体の温度から実流量を測定する。図18に検定中の様子を示す。本装置により測定した結果を図19に示す。図では実流量に対する出力信号周波数(Hz:タービン回転数×4)を示しており(○印)、比較のため従来の電磁ピックアップ(以下電磁P/Uとする)の測定結果(△印)も示した。なお図19では両者の差異を顕著に表すために、低流量域(44.97kg/hr(200PPH)以下)の部分を拡大して示してある。これによれば電磁P/Uでは、44.97kg/hr(200PPH)以下にて流量と出力周波数とは比例せず、低流量域では2.2で述べた理由により回転が抑制される傾向であることがわかる。これに対して、光ファイバP/Uでは29.23kg/hr(130PPH)以下まで流量に比例した出力周波数が得られ、これより測定レンジは190:1以上と大幅に拡大されている。



(1) タービンロータ加工前



(2) タービンロータ加工後

図16 出力信号のS/N Rの改善

電磁P/Uと光ファイバP/Uの出力信号波形の比較

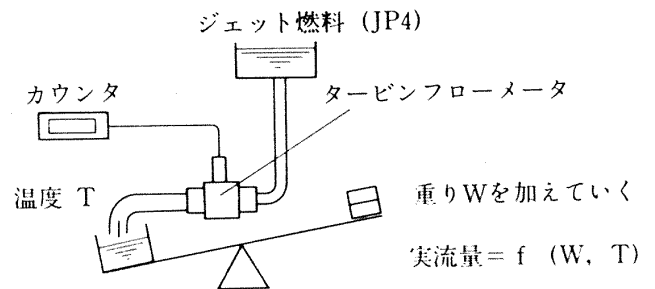


図17 TFMの標準校正装置(重量検定方式)

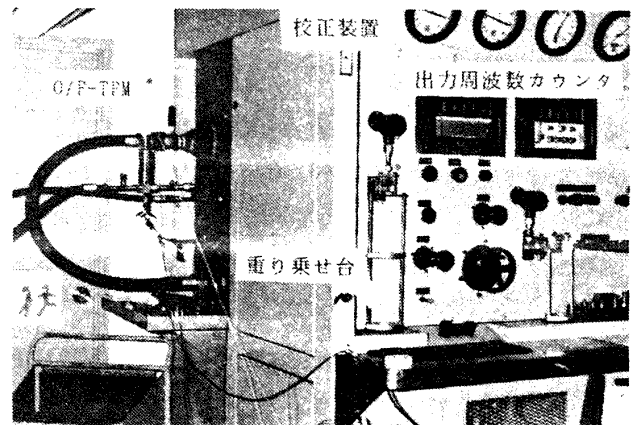


図18 TFM標準校正装置

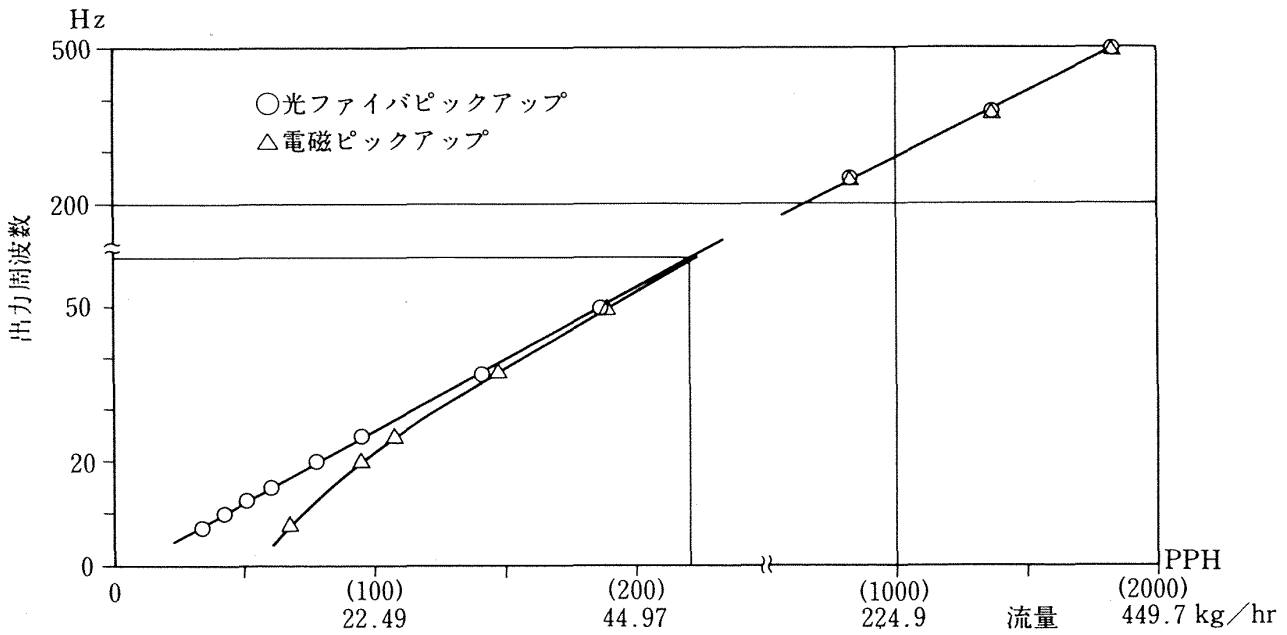
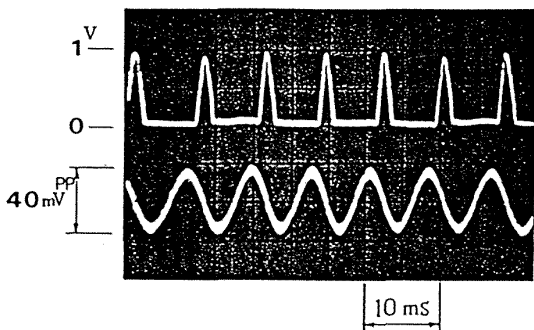


図19 光ファイバP/U式TFMの特性

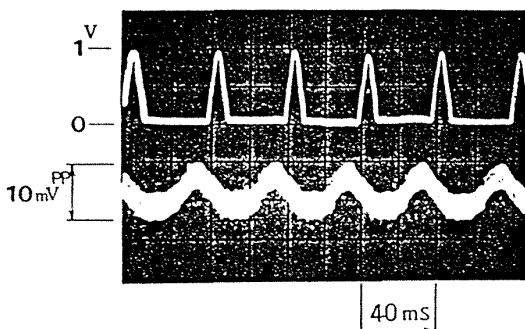
を図20に示す。これは流量が 112.4kg/hr (500PPH) での波形(1)と、電磁 P/U の出力が十分得られない状態での例として流量が 22.49kg/hr (100 PPH) の場合(2)の波形観測結果で、上段の波形が光ファイバ P/U、下段の正弦波が電磁 P/U の出力波形である。(ここで光ファイバ P/U と電磁 P/U の信号波形の位相が異なるのは、両者の TFM に装着してある位置が異なるためである) このように電磁 P/U では流量

の変化に対し波形自体の乱れが生じ S N R が悪くなる。また信号振幅も図21に示すように、ほぼ流量に比例して減少する。これに対して光ファイバ P/U では常に一定の振幅(約 1 V) が得られ、低流量域でも高い S N R で信号出力を得ることができる。LED の印加電圧に対する出力信号電圧振幅(○印)と S N R (△印) を図22に示す。

次にセンサと TFM 本体との装着位置のシール、及び光ファイバ自体への流体(燃料)の影響を調べるために、燃料圧力を実際の使用条件、3.43 MPa (500 PSI, 以上の 4.81 MPa (700 PSI)) 及び流量 1124kg/hr (5000 PPH) にて 3 時間の連続作動耐圧テストを行なった。図23にその様子を示す。この耐圧テストにて燃料の漏れ、光ファイバの損傷はみら



波形(1) 112.4kg/hr (500 PPH)



波形(2) 22.49kg/hr (100 PPH)

図20 出力信号波形の比較

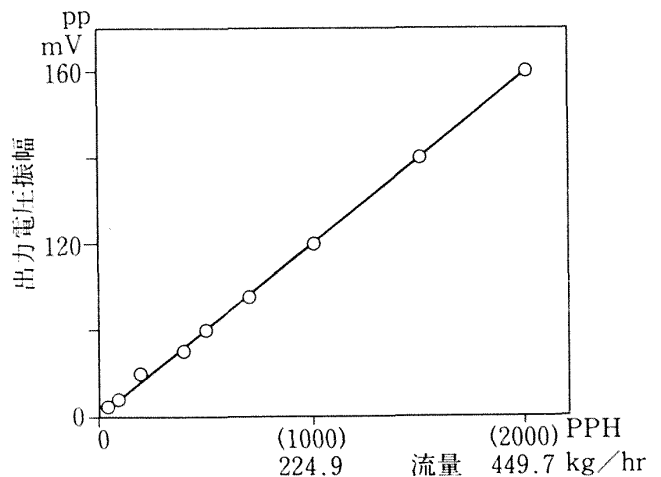


図21 電磁ピックアップの出力電圧

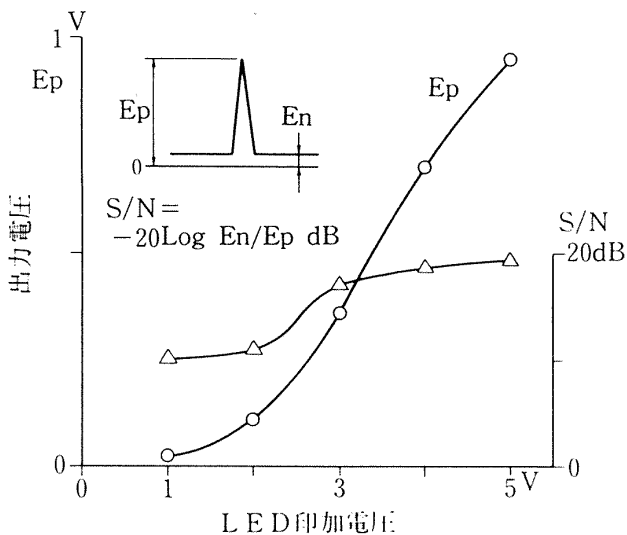


図22 LED印加電圧対出力電圧

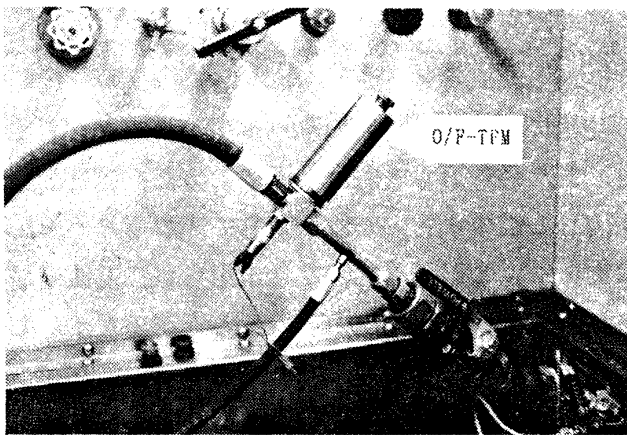


図23 連続作動耐圧テスト

(燃料圧力 4.81MPa (700PSI), 3時間)

れなかった。なお光ファイバセンサを使用する時、常に問題となるセンサ先端と反射体の汚れは、これ等が常に流体(燃料)で洗われている状態であるためほとんど無い。

5. 光ファイバP/U式TFMによる流量計測

試作した光ファイバP/U式TFMを、ジェットエンジンの燃料流量計測に使用した。計測対象はSTOL実験機に搭載されているFJR-710/600S、及び小型ターボファンエンジン(推力16.671kN)で、何れも起動時の燃料流量計測が従来の方法では十分に行なえないケースに使用した。一般にエンジンの起動時の燃料流量を計測するには、従来小流量計測用のTFMが必要であった。例えば上記のエンジンでは、最低流量が44.97kg/hr(200PPH)程度であるため、通常AN-8TFM(口径:12.7φmm,(1/2

インチ)、測定レンジ42.72kg/hr~427.2kg/hr(190~1900PPH))を使用している。この場合TFMの口径が燃料配管の口径に比べ小さいため(面積比で70%)、燃料の流れがTFMで絞られるために流量が振動状態を示す場合がある。また測定レンジもエンジンの最高流量(944.4kg/hr(4200PPH))より小さいため起動試験のみの使用となり、試験途中で口径の大きいTFMに切替える必要がある。図24はFJR-710/600Sの起動時に計測した燃料流量測定結果の一例である。これは出力信号を周波数-電圧変換器によりアナログ電圧で表したもので、起動後19秒までの変化を示している。ここで図の上段のデータは従来のTFM(AN-8)で、また参考のためCDP(高圧圧縮機出口圧力、回転数と同様な変化を示す)も示した。これより明らかのように、AN-8では測定値が上に述べた理由により振動を生じており、光ファイバP/U式TFM(下段のデータ)では、TFMの口径が燃料配管口径と同程度に大きいためそれが無い。また図25は小型ターボファンエンジンの急加速運転時の燃料流量と回転数の計測結果で、比較したTFMは図24のものと同じものである。(図で流量が階段状に上がるのは、TFMの応答性の問題でなく、ジェットエンジン始動時の燃料制御手順によるもので、エンジンを自立して運転できる最低流量が忠実に測定されている結果である)

図で光ファイバP/U式TFMとAN-8の縦軸のスケールは異なっており(前者は後者の約7倍になっている)、回転数出力はN-TFMが前者の測定時、N-AN8が後者の測定時に計測した結果である。この運転計測では電磁ノイズが多い環境であったため、図で明らかのようにAN-8の測定出力は起動から56.21kg/hr(250PPH)までの間測定が不可能である。これに対して光ファイバP/U式TFMでは、この様な問題は無い。

光ファイバP/U式TFMは上に述べた2種類のエンジンの起動及び性能試験に使用され、所定の性能を示した。この試験を通して、特に起動時の燃料流量を安定に計測でき、また起動より最高流量まで一つのTFMで実施できたことにより、経費及び時間を節約することができた。

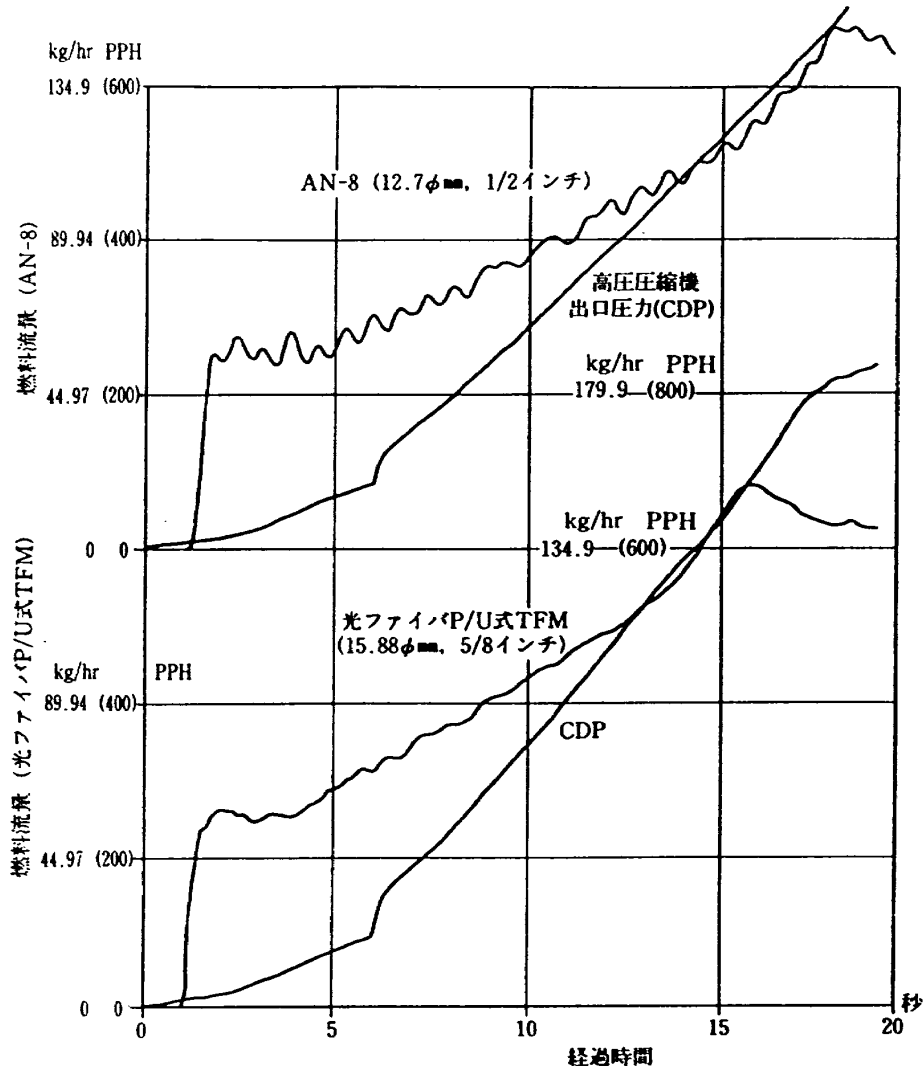


図24 ジェットエンジン起動時の燃料流量測定例 (FJR 710/600S)

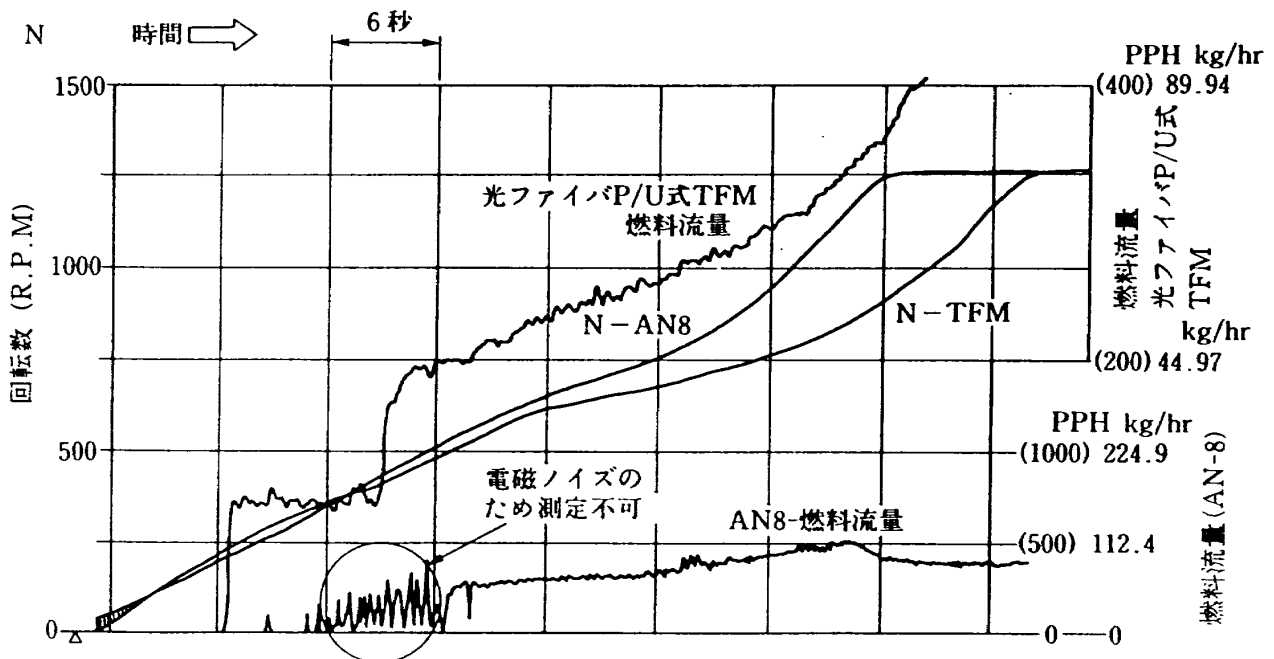


図25 ジェットエンジン急加速時の燃料流量測定例

現在までの使用実績は、試験回数 250 回以上、延べ動作時間約 60 時間、測定流量範囲は 0～944.4kg/hr (4200 PPH) で、使用後の性能上の変化は認められない。

6. まとめ

反射型光ファイバセンサをタービンフローメータ (TFM) の回転数ピックアップに適用し、光学的にタービンロータの回転数を計測する新しい着想の TFM (光ファイバ P/U 式 TFM) を考案し、光ファイバ P/U 及びこれを組み込んだ TFM を試作した。

この光ファイバ P/U 式 TFM は、従来の TFM で問題となっていた低流量域での流量対出力周波数の非直線性、回転数検出信号の出力振幅の減少による SNR を改善し、その結果従来の TFM の測定レンジを低流量側に大幅に拡大することを可能とした。試作した光ファイバ P/U 式 TFM は小型、軽量にまとめられており、実際の使用での取扱い及び配線等は、従来の TFM と同じである。

光ファイバ P/U 式 TFM の特性を TFM の標準校正装置により測定し、測定レンジの大幅な拡大を確認した。またこれを 2 種類のジェットエンジンの燃

料流量測定に用いて、その有効性を実証した。

終りに光ファイバ P/U 式 TFM の製作および特性測定では、石川島播磨重工業株式会社、末永一郎氏にご協力いただいた。ここで感謝の意を表します。

なお本光ファイバ P/U 式 TFM は実用新案願 (59-111927) を行なっていることを付記する。

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前刷 (昭和 55 年 11 月)
- 2) 松田, 遠藤「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」, 航技研資料 TM-535 (昭和 59 年 7 月)
- 3) 松田, 遠藤「光ファイバピックアップ式タービンフローメータ」, 第 23 回計測自動制御学会学術講演会前刷 (昭和 59 年 7 月)
- 4) 松田, 遠藤「反射型光ファイバセンサを用いたタービンフローメータ」, 計装, 1985 Vol. 28-2
- 5) 内藤正編著「工業計測法ハンドブック」, 朝倉書店

航空宇宙技術研究所報告923号

昭和62年2月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7丁目44番地1
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段南4-2-12
