

配 布 先 限 定

NAL TM-471

ISSN 0452-2982

UDC 681.2.08:

534.08

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-471

## ファン動翼振動計測装置の試作

遠 藤 征 紀 ・ 松 田 幸 雄 ・ 松 木 正 勝  
森 田 光 雄 ・ 吉 田 晃 ・ 中 山 普  
関 根 静 男

DP-55

1982年9月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

# ファン動翼振動計測装置の試作\*

遠 藤 征 紀\*\* 松 田 幸 雄\*\* 松 木 正 勝\*\*\*  
森 田 光 雄\*\* 吉 田 晃\*\* 中 山 普\*\*  
関 根 静 男\*\*

## 1. ま え が き

通産省工業技術院の大型プロジェクト「航空機用ジェットエンジンの研究開発」の一環として FJR 710 ターボファンジェットエンジンの横風試験が実施された。これは、横風試験用に製作した送風設備により正面から  $60^\circ$  斜の位置までのいろいろの角度でエンジンに向けて最高  $60\text{ m/s}$  の風を吹きつけて飛行時を模擬しその時のエンジンの性能の変化やファン動翼の振動等を調べようとするものである。

本報告は、上記横風試験においてファン動翼の振動をファン入口ダクト内の流れに影響を与えることなく計測する目的で試作したファン動翼振動計測装置についてその原理、構成と横風試験においての試験結果について報告するものである。

文中で使用される文字および添数

文 字

$d$  : 動翼先端の曲げ振動による変位

$I$  : S センサーにより最初に検出される動翼

$k$  : サンプル回転回数

$K$  : 1 回の計測で計測するファン回転回数

$L$  : 動翼先端の円周長

$m$  : S センサーの数

$n$  : 動翼枚数

$N$  : 1 チャンネル当りデータ数 ( $K \times n$ )

$P$  : 基準マーク (センサー, 信号)

$t$  : 実時間

$Y$  : センサーと動翼先端との距離

$\alpha_E$  : 迎角

$\delta$  : 動翼先端の円周方向変位

$\theta$  : ねじり振動による回転角

$\xi$  : くい違い角

$\varphi$  : 曲げの方向

$\tau$  : ディスク回転の時間で規準化した無次元時間  
添 数

$\alpha$  : センサー番号

$\beta$  : データ (パルス) 番号

$i$  : 動翼番号

## 2. 原 理

本装置のもとになる一般的な原理については文献<sup>1)</sup>で述べたが、ここでは本装置の構成に沿って説明する。

図 1 に本装置によりファン動翼の振動を計測する場合のシステムの全体構成を示す。ファンケーシング上に取り付けた動翼先端検出器 (以後 S センサーと呼び、その出力信号を S 信号と呼ぶ)  $\#1 \sim \#m$  は動翼が検出器の直下を通過するたびに、また、基準マーク検出器 P (以後単に P センサーと呼び、その出力信号を P 信号と呼ぶ) はディスク上に設けた基準マークが検出器を通過するたびにパルス信号を発する。P センサー, S センサーとも光式の検出器であり、データ収集装置内の各々のセンサーごとに設けられた、 $m+1$  チャンネルの光電変換回路によって電気信号に変換される。各チャンネルは波形整形回路, サイクルカウンタ, ランダムアクセスメモリを備えており、計測開始とともに最初の P 信号から各 S 信号, P 信号パルスまでの時間を計時してメモリに格納する。データ処理・表示装置はデータ収集装置のメモリに格納されたデータをもとに各動翼

\* 昭和 57 年 6 月 28 日受付

\*\* 原 動 機 部

\*\*\* 科 学 研 究 官



の振動を求める計算を行って結果をCRT上に表示する。

これを図2によって詳しく説明する。図中実線で示したパルス信号は、動翼の振動が無視できる程度に小さい状態（以下基準状態と呼ぶ）におけるSセンサー#1～#mの出力信号およびPセンサーの出力信号である。横軸はディスクが1回転する時間（P信号から次のP信号までの時間）により規準化された時間である。図2は#1Sセンサーにより最初に検出される動翼が動翼1, 2番目に検出される動翼が動翼2, ……であり、さらに、#2センサーにより最初に検出される動翼が動翼n, 2番目に検出される動翼が動翼1, ……の場合を示している（この関係は実際に試験を行なう時には、センサーの取付位置と基準マークの位置が決まると機械的に決まる）。さて、基準状態において計測を行い計測開始指令信号後最初のP信号から各パルス信号までの時間を(m+1)個のすべてのチャンネルで計時した後データ処理・表示装置に読み込み、基準データとして格納する。次に振動が発生する他の状態において同様の計測をする。この場合、動翼が振動することによってP信号から各パルスまでの時間は基

準状態と異なったものとなる。図2中にはこの場合の各チャンネルのパルス信号を破線で示してある。この時のデータと先に求めておいた基準データとの差を計算すると各動翼の変位が求められる。すなわち、P信号発生時点から#αSセンサー(α=1, ……m)のβ番目(β=1, ……N)のパルス信号までの時間(連続した2つのP信号間の時間で規準化したもの)データをマトリクス $[\tau_{\alpha}, \beta]$ で表わし、基準状態において求めた $[\tau_{\alpha}, \beta]$ を $[\tilde{\tau}_{\alpha}, \beta]$ で表わすとすれば、

$$[\delta_{\alpha}, \beta] = [\tau_{\alpha}, \beta - \tilde{\tau}_{\alpha}, \beta] \cdot L \quad (1)$$

で表わされるマトリクス $[\delta_{\alpha}, \beta]$ は振動による動翼先端の変化を表わす変位マトリクスとなる。次に変位マトリクス $[\delta_{\alpha}, \beta]$ のなかから動翼iの変位を時間の順に抽出して図2(b)に示すような振動波形を求める必要があるが、そのためには#αSセンサーにより最初に検出される動翼の番号である先頭動翼番号 $I_{\alpha}$ を用いる。すなわち、 $k=1, \dots, K$ の各々のkについてα=1, ……mと変えた時のβを次の式により次々に求めて対応する $\delta_{\alpha}, \beta$ ( $\delta_{\alpha}, \beta^*$ と記す)を順次ならべれば良い。ただし、 $\delta_{\alpha}, \beta^*$ に対応する時間としては $\tau_{\alpha}, \beta$ を実時間になおした $t_{\alpha}, \beta$ ( $t_{\alpha}, \beta^*$ と記す)を用いる。

$i \geq I_{\alpha}$  を満たす動翼については

$$\beta = (i - I_{\alpha} + 1) + (k - 1) \times n \quad (2)$$

$i < I_{\alpha}$  を満たす動翼については

$$\beta = (n - I_{\alpha} + i + 1) + (k - 1) \times n \quad (2)'$$

図3に以上の手順をまとめて示す。

以上の説明でもわかるとおり、本計測装置で直接に計測されるのは動翼先端振動の円周方向成分の振動波形である。厳密に言えばファン動翼の振動はいろいろな振動モードが重なった複雑なものであり、動翼先端の振動についても円周方向の振幅から忠実に再現するのは困難である。しかし、経験的に言ってファン動翼振動のほとんどは1次曲げおよび1次ねじり振動成分で占められていることを考えると、この方法によっても、ほとんどの場合実用上問題のない結果を得ることができると考えられる。図4は

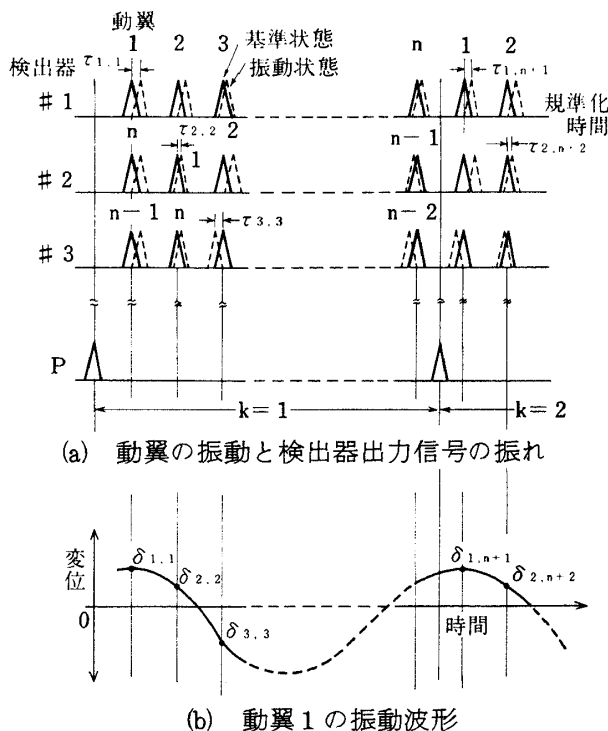


図2 ファン動翼振動計測装置原理図

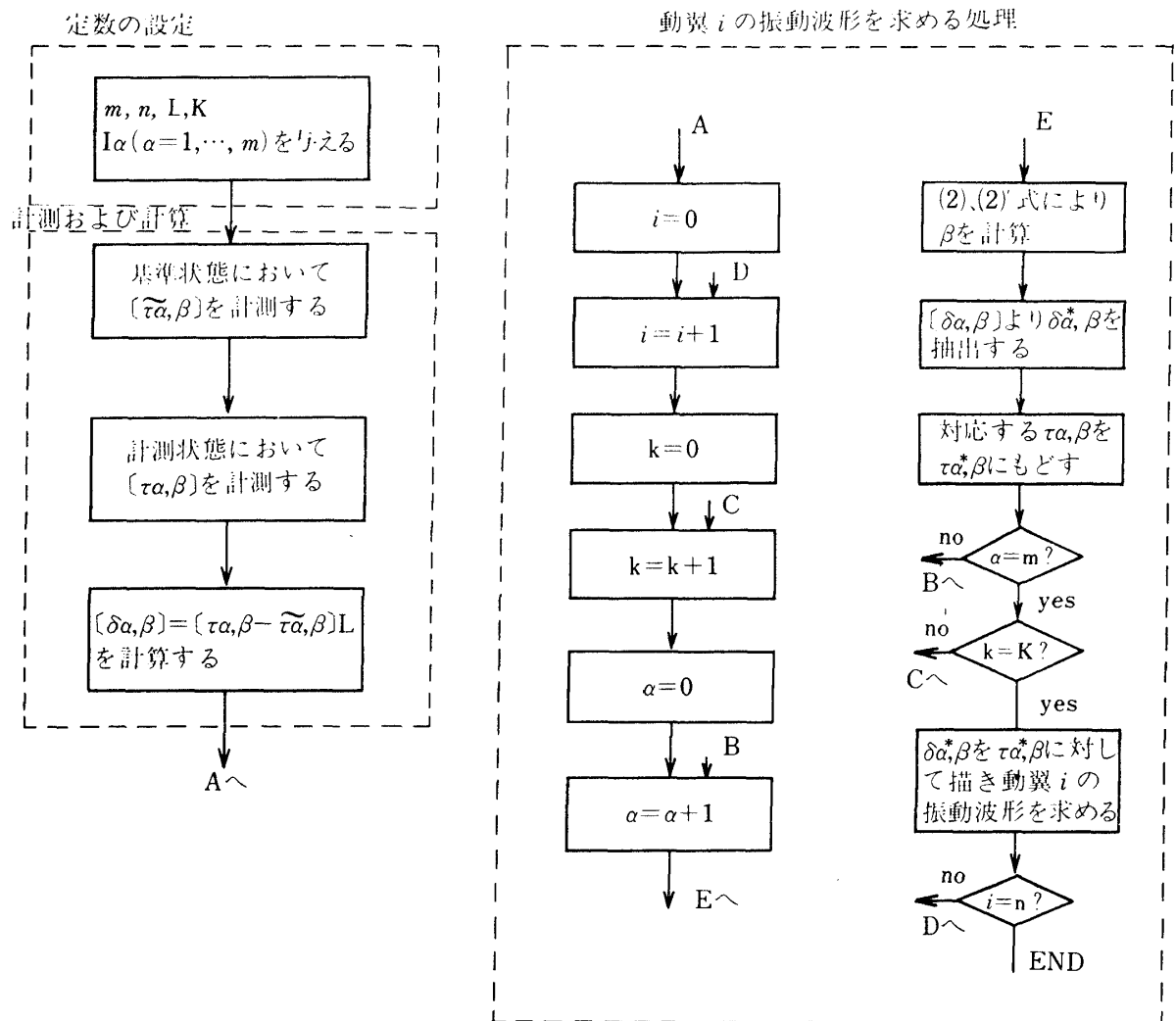
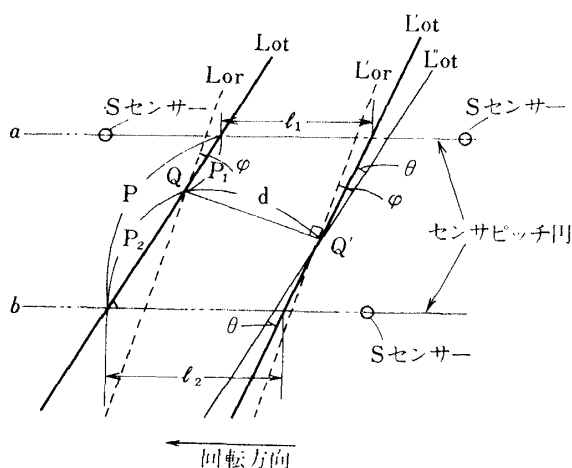


図 3 動翼振動の計測とデータ処理手順

図 4 1 次曲げ, 1 次ねじり振動と  
円周方向変位との関係

動翼と S センサーの円周方向展開図である。図において Lot, Lor はそれぞれ基準状態における動翼先

端の翼弦, 1 次曲げ振動の節の部分の翼弦であり, Q は 1 次ねじり振動の中心位置である。φ は Lot と Lor とがなす角度で, 翼根部におけるくい違い角と動翼先端におけるくい違い角との差を φ' とする時 φ = Cφ' となる。ただし 0 < C ≤ 1 で実験的に求める。1 次曲げ振動のみによる変形後の Lot を Lot'', これに 1 次ねじり振動が加わった時の Lot を Lot' とする。ただし, Lot'' は Lot 上の各点を Lor に直角方向に等しい距離だけ移動して, また, Lot' は Lot'' を Q' を中心に角 θ だけ回転させて求める。これは, 1 次曲げ振動と 1 次ねじり振動による変形が互いに独立に起きていると仮定したことになる。ねじりの中心 Q の移動距離 QQ' = d を 1 次曲げによる振動振幅と定義すると, d および θ は次式のように求められる。

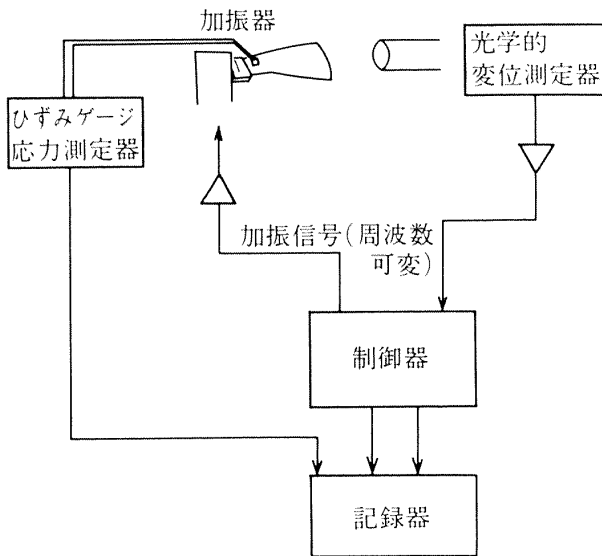


図5 振動振幅-応力キャリブレーション装置

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\sin \xi}{\frac{P}{l_2 - l_1} - \cos \xi} \quad (3)$$

$$d = \frac{\sin(\theta + \xi)}{\cos(\varphi - \theta)} \times \frac{l_1 P_2 + l_2 P_1}{P} \quad (4)$$

(3), (4)式中の  $l_1$ ,  $l_2$  は本計測装置により直接に計測される動翼先端のピッチ円周方向の変位である。ねじりの中心Qの位置はレーザーホログラフィー試験等によって予め求めることができる。

このようにして1次曲げによる振動振幅  $d$  および1次ねじり振動  $\theta$  が求まる。 $d$  あるいは  $\theta$  とひずみ

ゲージによる測定応力との関係が必要な場合には、図5に示すような振動振幅-応力キャリブレーション装置により1次曲げ振動あるいは1次ねじり振動を発生させて求める。

### 3. ファン動翼振動計測装置の構成

従来ファン動翼の振動は動翼上に貼付けたひずみゲージの出力信号をスリップリングまたはテレメータを介してエンジン外部に取り出して計測していた。しかし、この方法では、(イ)スリップリングにおいてはスピナ前方に新たな構造物が加わるため、周囲の空気流に影響を及ぼす恐れがある。(ロ)テレメータにおいてはチャンネル数に制限があるうえ、エンジン内部を加工する必要がある。(ハ)計測できる動翼の数に制限がある、等の問題がある。そこで、すでに第2章で説明した原理にもとづく新しい動翼振動計測法についての研究成果<sup>1), 2)</sup>をもととして、すべてのファン動翼の振動を非接触、準リアルタイムで計測することのできるファン動翼振動計測装置を製作した。本装置の全体構成はすでに図1に示したようにセンサー、データ収集装置、データ処理・表示装置より成る。図6にデータ収集装置とデータ処理・表示装置の外観を示す。

#### 3.1 センサー

本装置のセンサーとしては回転中の動翼の先端を

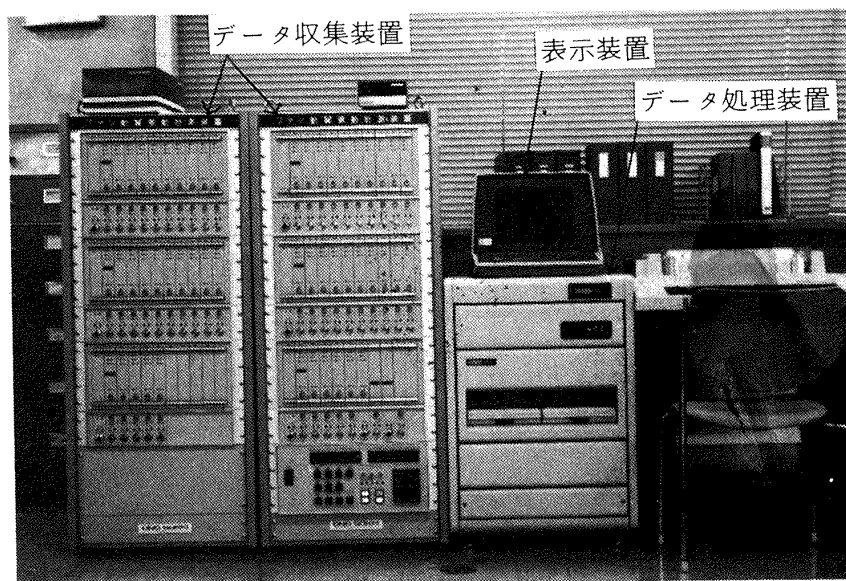


図6 データ収集装置、データ処理・表示装置の外観

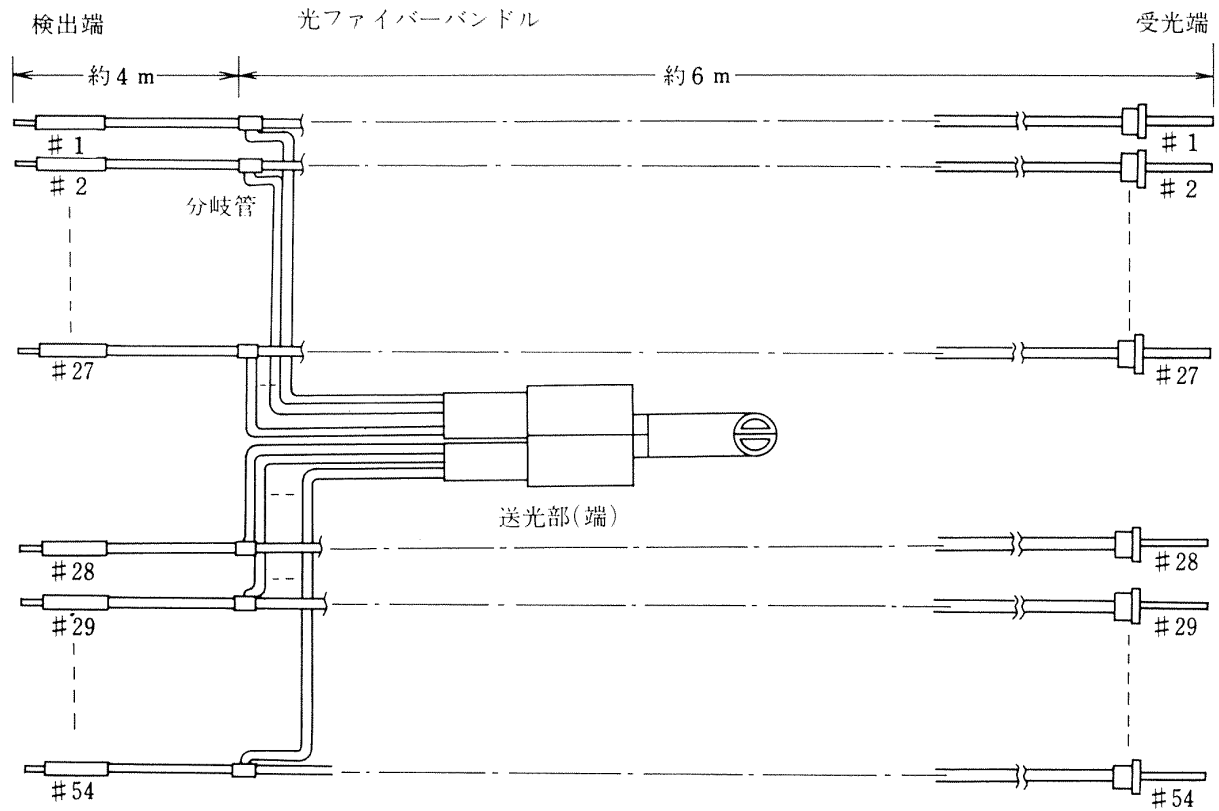
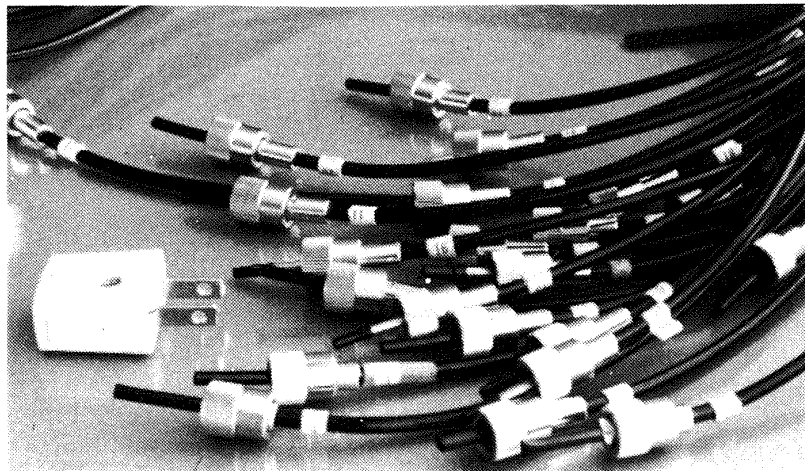
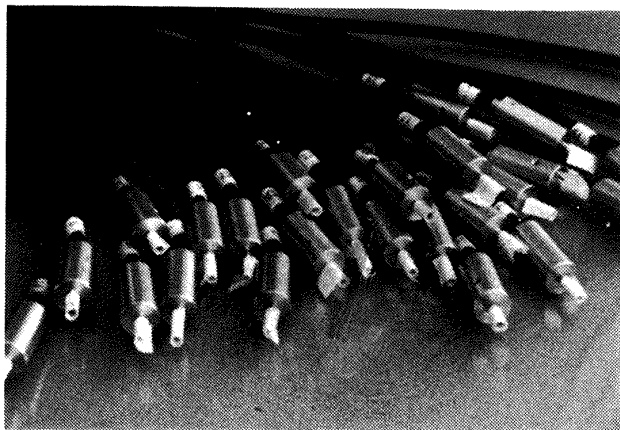


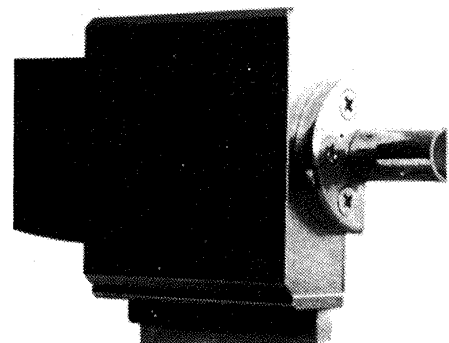
図 7 動翼先端検出器の構成



受光端



検出端



送光部(片側)

図 8 S セ ン サ ー

検出する動翼先端検出器（S センサー）と、ディスク上の基準マークを検出する基準マーク検出器（P センサー）とが必要である。基準マークとしては通常ディスク上に付した黒色のマーク，反射率の高い銀紙またはつり合い試験用のボルトなどが用いられる。センサーとしては電氣的なものと光式的ものと考えられるが，応答性，雑音，価格等を考慮して光式的ものを用いることとした。光式のS センサー，P センサーの一般的設計法については文献2）において詳しく述べたが，その成果をもとに本装置用として新しく設計した。図7にS センサーの構成を，また図8にその外観を示す。センサーは太さ $30\mu$ の光学ガラス系の光ファイバーを束にしたもので，合計27本のセンサーを一組として2組製作した。27本のセンサーは光源の光を注入する送光部において一体化し，光源の注入を容易にする一方，すべてのセンサーにできる限り均一な光を注入するようにした。送光部より注入された光は光ファイバーにより検出端に導かれ，動翼の先端または基準マークに向けて放射され，その一部は反射して再び検出端に入る。検出端には送光部につながっている光ファイバーと，受光端につながっている光ファイバーとがランダムに混ぜ合わせて配置されている。反射した光のうち受光端につながっている光ファイバーに入ったものは受光端に達してデータ収集装置内の光電変換器に入力される。図9にS センサーの特性を示す。この図から，センサーと動翼先端との距離は4 mm程度になっても十分に検出できることがわかる（波形整形に必要なしきい値は $200\sim300mV$ で

十分である。）

### 3.2 データ収集装置

データ収集装置は図10に示すように，光電変換部，カウンタ・メモリ部，制御部より成る。データ収集装置への入力信号としては，センサーからのP信号とS信号，データ処理表示装置からの各種指令，制御信号およびデータ信号があり，データ処理・表示装置への出力信号としては各種制御信号およびデータ信号がある。データ収集装置は図11に示す構造の匡体（以後ユニットと呼ぶ）より成り，今回のファン動翼振動計測装置では2ユニット製作した。1ユニットには，1個の光電変換回路と1個のサイクルカウンタ・メモリを1組として最大33組（チャンネル）収納できる。2つのユニットの各チャンネルは共通のデータバスにより結ばれている。そのうちの1つのユニットには，制御部が組込まれている。制御部を収納したユニットのうちの1チャンネルはP信号用になっており，他のS信号用とは異なった回路となっている。

#### (1) 光電変換部

光電変換部は光式のP センサー，S センサーの出力である微弱な光パルス信号を電気パルス信号に変換して増幅し，後段のカウンタ・メモリ部への入力信号に必要な形に整形する働きをする。図12に光電変換回路の概略を示す。光電変換回路の中心である光電変換素子の選定の規準としては，センサーからの光信号が，動翼先端とセンサーとの距離を最大4 mmとして略々 $2\sim10\mu W$ であること，入力信号のパルス数が最大30,000パルス/秒（将来圧縮機の動翼の振動を計測することを考慮して回転数15,000 rpm 動翼枚数120枚として）であること等を考慮してBell Howell 539-003-5型光電変換素子を選定した。同素子の主な性能を表1に示す。この素子は図13に示すように，PIN型のシリコンフォトダイオード受光素子，100MHz帯域をもつ電流モードのオペレーションアンプなどを金属ケース内に集積化したものである。

コンパレータは光電変換素子の出力信号が，しきい値以上になった場合に矩形波を発するものであり動作安定化，パルス幅設定回路は入力信号の波形の

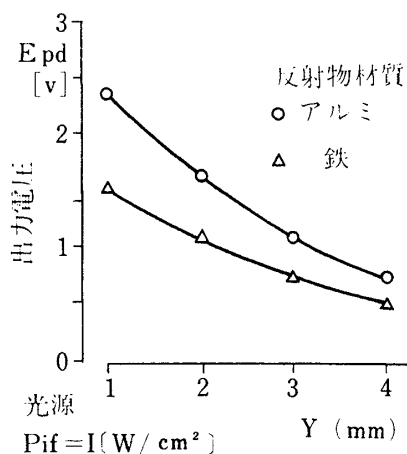


図9 S センサーの距離－出力電圧特性



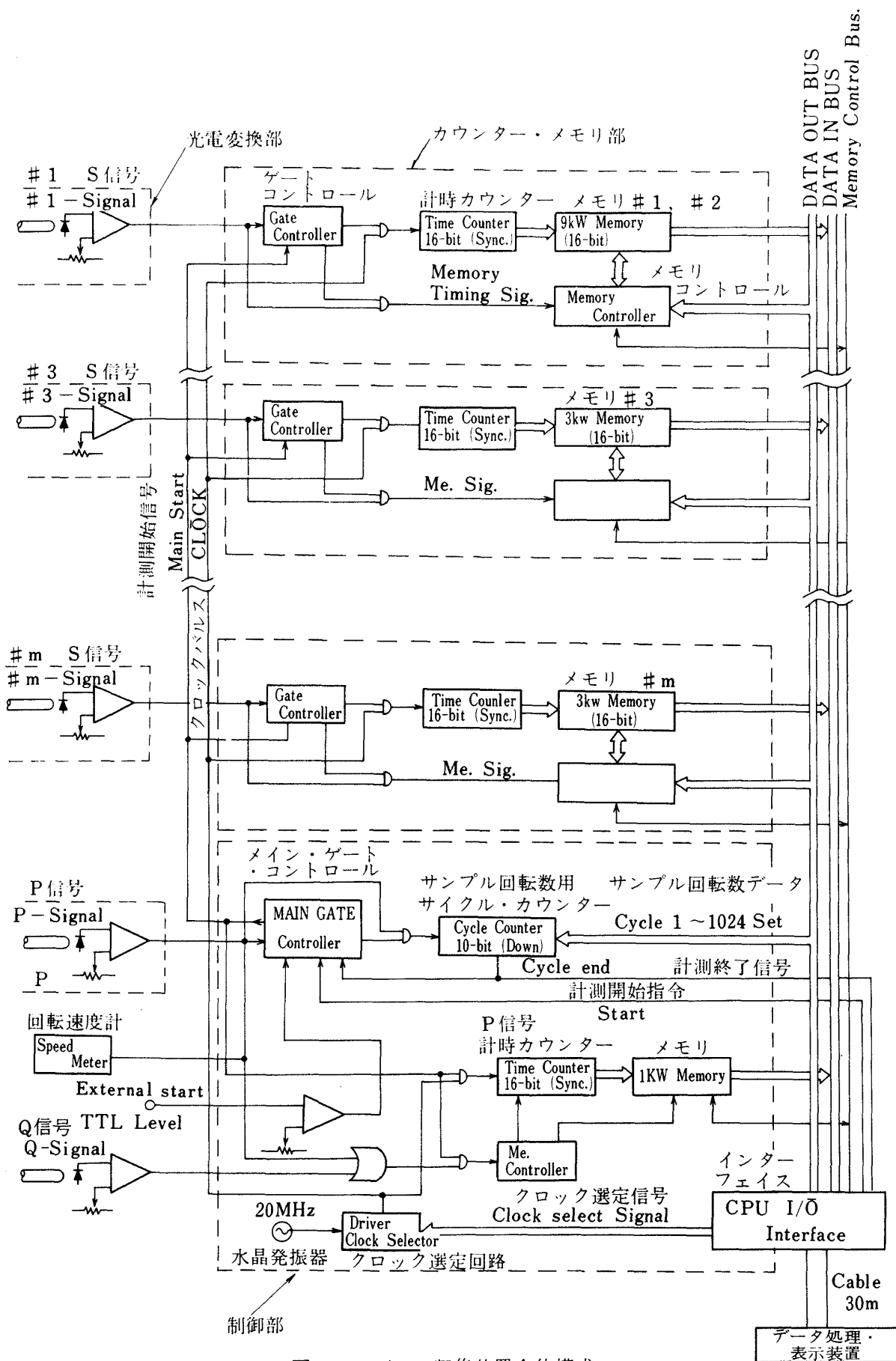


図 1 0 データ収集装置全体構成

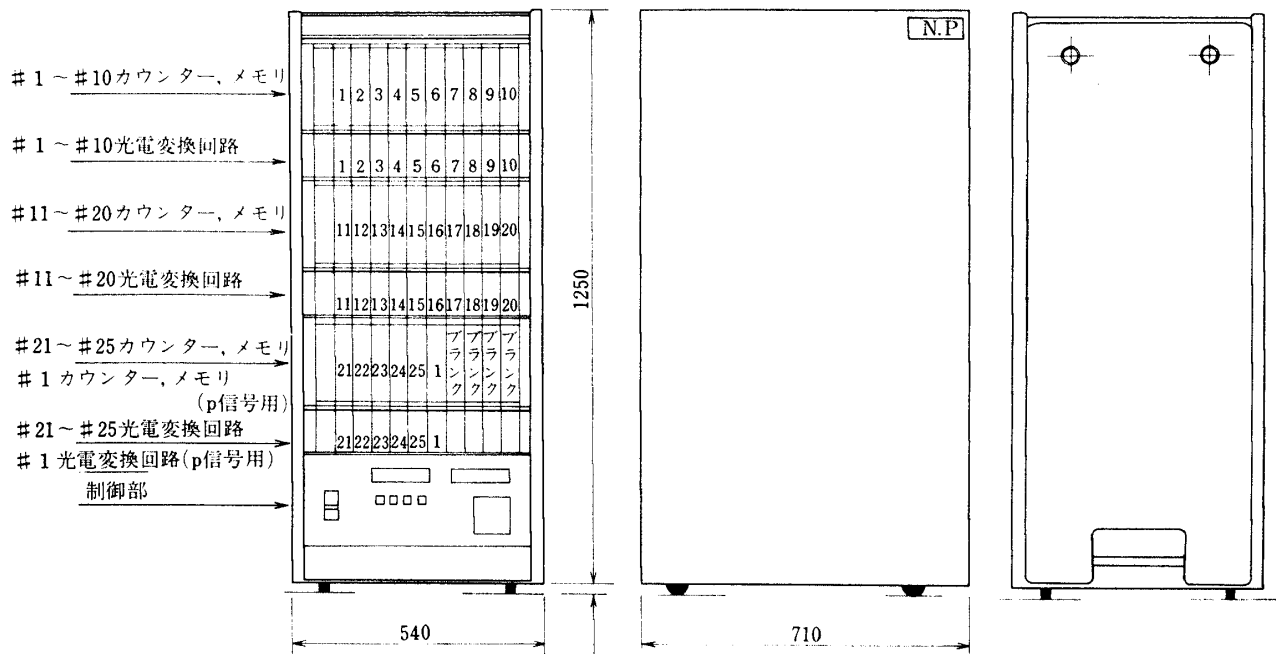


図 1.1 データ収集装置

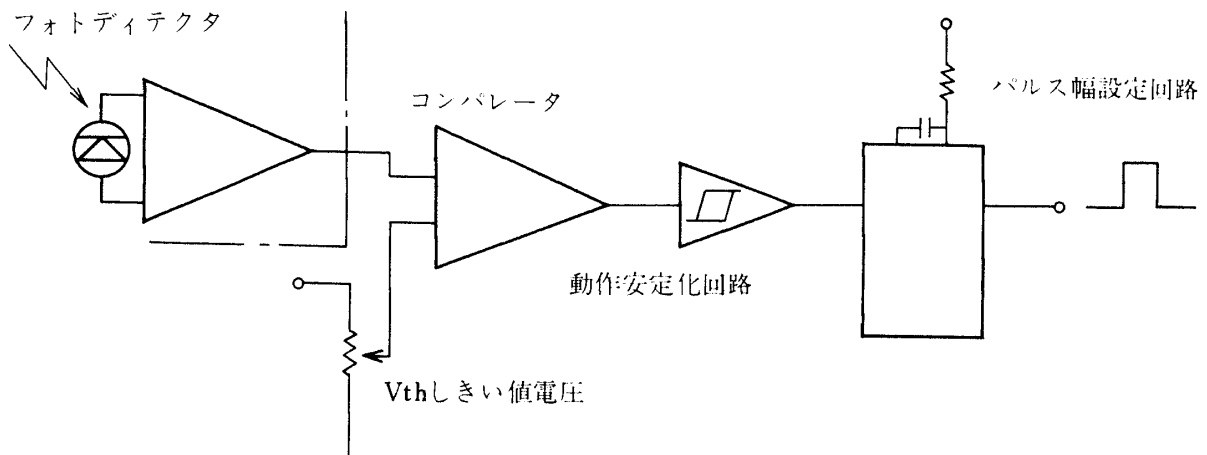


図 1.2 光電変換回路

表 1 Bell Howell 539 型光電変換素子の特性

帰還抵抗	30 k $\Omega$
PIN ダイオード面積	5 mm <sup>2</sup>
感度 (2870°K タングステン)	7
周波数帯域	10 MHz
立上り時間	35 nsec
オフセット電圧 (Max)	8 mV
スリュー・レイト	35 V/ $\mu$ sec
出力電流	18 mA
電源電圧	$\pm 5$ V $\sim$ $\pm 20$ V
バイアス電圧	0 $\sim$ 45 V
動作温度	0 $\sim$ 70 °C

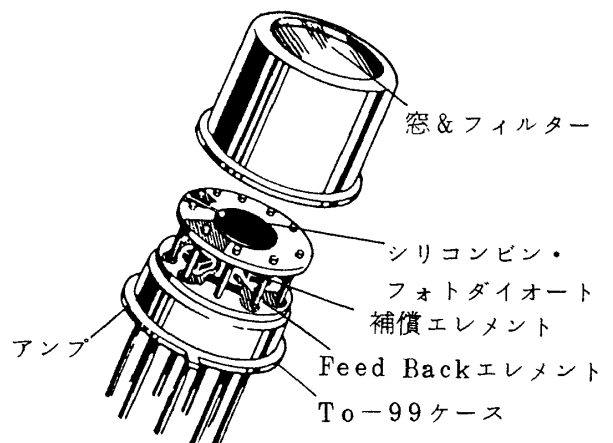


図 1.3 Bell Howell 539 型光電変換素子の構造

よってコンパレータが不正動作をした場合にこれを抑圧する働きをする。

光電変換部は、光電変換回路11個(11チャンネル)を図14に示すケース内に収納してデータ収集装置のユニットに装着する。各チャンネルの出力信号はケース前面から取り出して同軸ケーブルにより後段のカウンタ・メモリ部に入力される。

## (2) カウンタ・メモリ部

カウンタ・メモリ部の構成は図10に示したが、これは大別して基準となる時刻から光電変換部よりのパルス信号を受けとるまでの時間を内部発生のカロックパルスにより計時するサイクルカウンタと計時結果を記憶するメモリとから成る。外部からカウンタ・メモリ部への入力信号は、センサー信号およびデータ処理・表示装置から制御部のインタフェイスを介して送られてくるメモリ制御信号、計測開始信号(停止信号)、カウンタリセット信号等の操作信号とである。

制御部のメイン・ゲート・コントロール回路により発生したメイン・スタート信号がカウンタ・メモリ部の各チャンネルに入力されると、同じく制御

部のクロックパルス選定回路で発生したクロックパルスが各チャンネルのサイクルカウンタへ入力されるゲートを開き、サイクルカウンタはクロックパルスの計数を開始する(図15)。以後カウンタは計数を続けるがS信号が入力されるたびにその時の値をメモリに次々格納する。カウンタは15ビット・バイナリ、同期式のサイクル・カウンタであり、最大値32767( $2^{15}-1$ )に達すると再度1から計数する。ここで先頭の1ビットはP信号の直後のS信号入力に対しオンとなり、これよりカウンタの動作チェックができる。

メモリはアクセスタイムが約450nsのスタティックRAMで、1ユニットのうち2チャンネルのみが16ビット9K語、他は16ビット3K語の記憶容量となっている。メモリの内容は制御部を介してデータ処理・表示装置から1語単位で読み書き可能である。

カウンタとメモリは図16に示すように同一基板上に配置され、各チャンネル毎に電磁シールド用の金属カバーでおおった後、10チャンネルを1組としてケース内におさめ、データ収集装置のユニットに装着した。各ケース間は図17に示すように外部バスにより結合した。各チャンネルの電源には外部からのノイズの混入を防止する回路を付加した。

## (3) 制御部

制御部は、(イ)データ処理・表示装置とのインタフェイス、(ロ)計時クロックパルスの発生、(ハ)計測開始信号の発生、(ニ)サンプル回転回数の選定と計数、(ホ)P信号の計時と記憶、等の機能を有する。

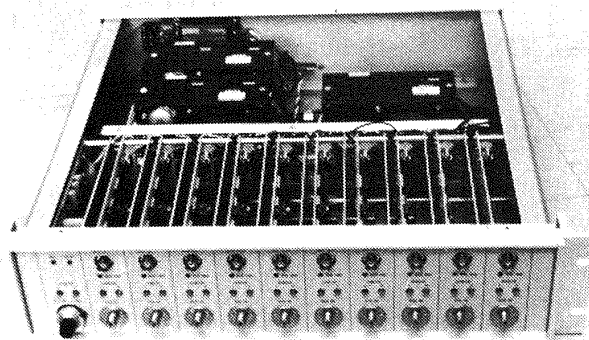


図14 光電変換回路収納ケース

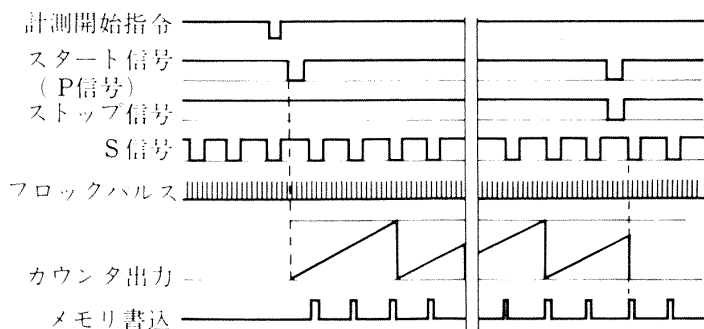


図15 各信号のタイムフロー

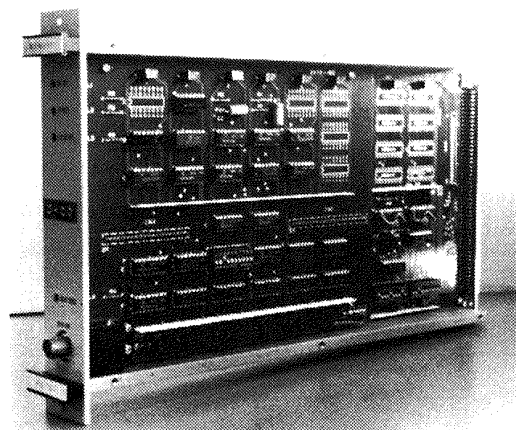


図16 カウンタ・メモリ基板

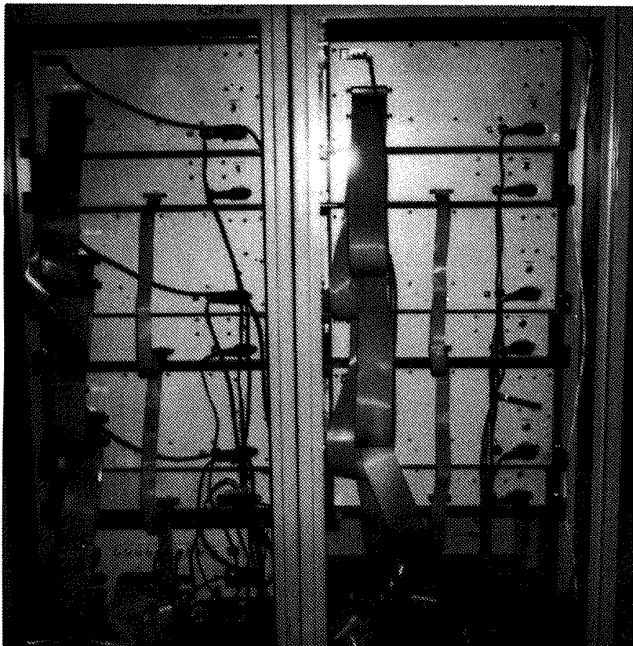


図 17 データ収集装置のバス

データ処理・表示装置との信号の交換を行うインタフェース部には 8 ビットのマイクロコンピュータを使用した。データ信号としては各チャンネルのメモリの読書き信号とデータ信号，サンプル回転回数およびクロック周波数選定信号があり，操作信号としては計測開始，計測停止信号（データ処理・表示装置からデータ収集装置へ）および計測終了信号（データ収集装置からデータ処理・表示装置へ）とがある。

クロックパルスは発振周波数 20MHz，周波数安定度  $\pm 5 \times 10^{-5} / \text{day}$  (25℃) の水晶発振器の出力信号を分周して発生しており，パルス間隔が 0.1，0.2，0.5，1.0，2.0，5.0，10  $\mu\text{sec}$  の 7 種類がある。動翼先端間隔，回転速度，動翼の振動数等に応じて適当な値を選ぶ。クロックパルス間隔があまり短いものを選ぶとサイクルカウンタがひんばんに最大値 32767 に達してしまい，後でソフトウェアで処理するとき生データの処理が困難になる。また，あまり長いものを使用すると振動波形の分解能が悪くなる。振動 1 周期の間に 100～200 パルス程度（0.5～1% の分解能）が適当であろう。

計測開始信号はデータ処理・表示装置からの計測指令信号を受けた後の最初の P 信号によって発せられ，すべてのチャンネルに同時に伝えられる。これを受けた各チャンネルのサイクルは一斉に計時を開

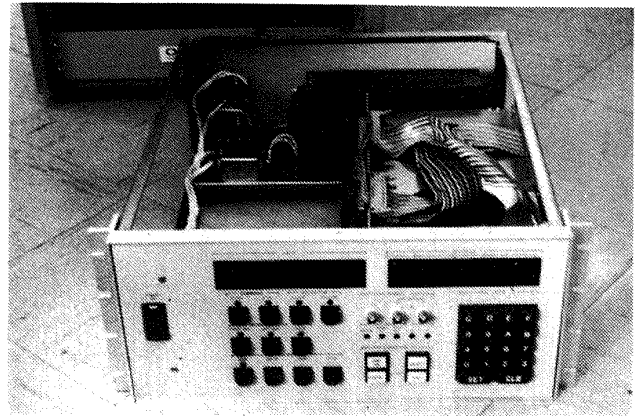


図 18 制御部

始する。また計測開始信号がオフになると計時を停止する。

計測時間は計測前にサンプル回転回数をカウンタに設定し，P 信号により 1 回転ごとに設定値をカウント・ダウンさせ，カウンタ値がゼロになったら計測終了信号を発して計測開始信号をオフにすることにより設定する。計測終了信号はデータ処理・表示装置にも送られる。

P 信号はメインゲート・コントロールに送られ計測開始信号を発生するとともに，P 信号用の計時カウンタに入力される。計時カウンタは計測開始信号から P 信号までの時間を計時し，その結果を 16-bit 1kW のメモリに記憶する。図 10 中の Q 信号というのは，ローターが 1 回転する間の回転速度の変動が無視できない時に，ディスク上に設けた P 以外の基準マーク Q を検出した信号のことである。<sup>1)</sup> 今回の実験では Q 信号は使用していない。

制御部はデータ収集装置の電源とともに図 18 に示す外観のケース内に入れ，データ収集装置の 1 つのユニットの底部に納められる。制御部の前面には以上に述べた機能をデータ処理・表示装置がなくても実行できるように，各種の操作ボタンやスイッチ，デジタル表示管，メーターなどが備えられている。

### 3.3 データ処理・表示装置

データ処理・表示装置は，(イ)データ収集装置のメモリに収録されたデータを読み込んで解析し，動翼の振動波形を求め，結果を CRT 上に準リアルタイムで表示する，(ロ)計測時における人と装置とのインタフェースとしての働きをする，(ハ)データをフロッピ

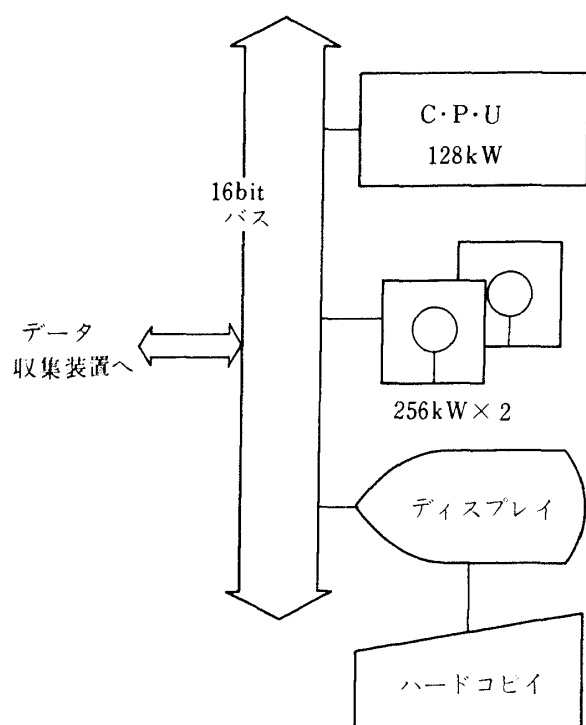


図 1 9 データ処理・表示装置の構成

ーディスクに格納して保存し、後日解析する、(⇒)データ収集装置の故障診断を行う、等の機能を有する。

図 1 9 にデータ処理・表示装置の全体構成を示す。装置の中心である計算機は 16-bit, 128K 語の DEC PDP-11/23 マイクロコンピュータである。計算機には 16bit×256K 語×2 チャンネルのフロッピーディスクメモリが外付されており、計測データの格納に使用する。データ表示装置は計算機内のプログラムによって駆動して計算結果を図形表示する。データ表示装置には複写装置が接続されており、表示された図形やデータをそのままハードコピーとして複写することができる。

### 3.4 ソフトウェア

計測プログラムはフォートランを使用し、主プログラム 4 種類（規模は 10～17 K 語）とサブルーチンプログラム 25 種類より成る。主プログラムは、オンライン計測プログラム、オフライン処理プログラム、基準状態マトリクス作成プログラム、データ収集装置チェックプログラムより成る。

図 2 0 にオンライン計測プログラムとオフライン処理プログラムのフローチャートを示す。( ) の中は使用サブルーチン名である。オンライン計測というのはデータの収集、計算、振動波形の表示、データの格納までの一連の作業を計測中に準リアルタイムで繰返して行うものである。また、オフライン処理というのは、オンライン計測においてフロッピーディスクに随時格納したデータを計測終了後にオフラインで読出して処理することによって、計測精度を向上させるとか振動波形をハードコピーにとるものである。図中の基本データというのは、基準状態マトリクス、動翼先端直径、動翼枚数、動翼に関する角度  $\xi$ ,  $\alpha$  等の定数で、センサーの配置を決めると値が決まってしまう最初にメモリに格納しておけば計測中に変える必要のないものである。クロックパルスの選定、サンプル回転回数、振動波形表示上の指定値等は計測中においても適宜変える必要があるため容易に変えられるようにしてある。また、計測中において必要な時にデータ格納やデータの印字ができるようになっている。プログラム全体は対話形式にし、操作が容易なようにした。図 2 1 にプログラムの操作例を示す。

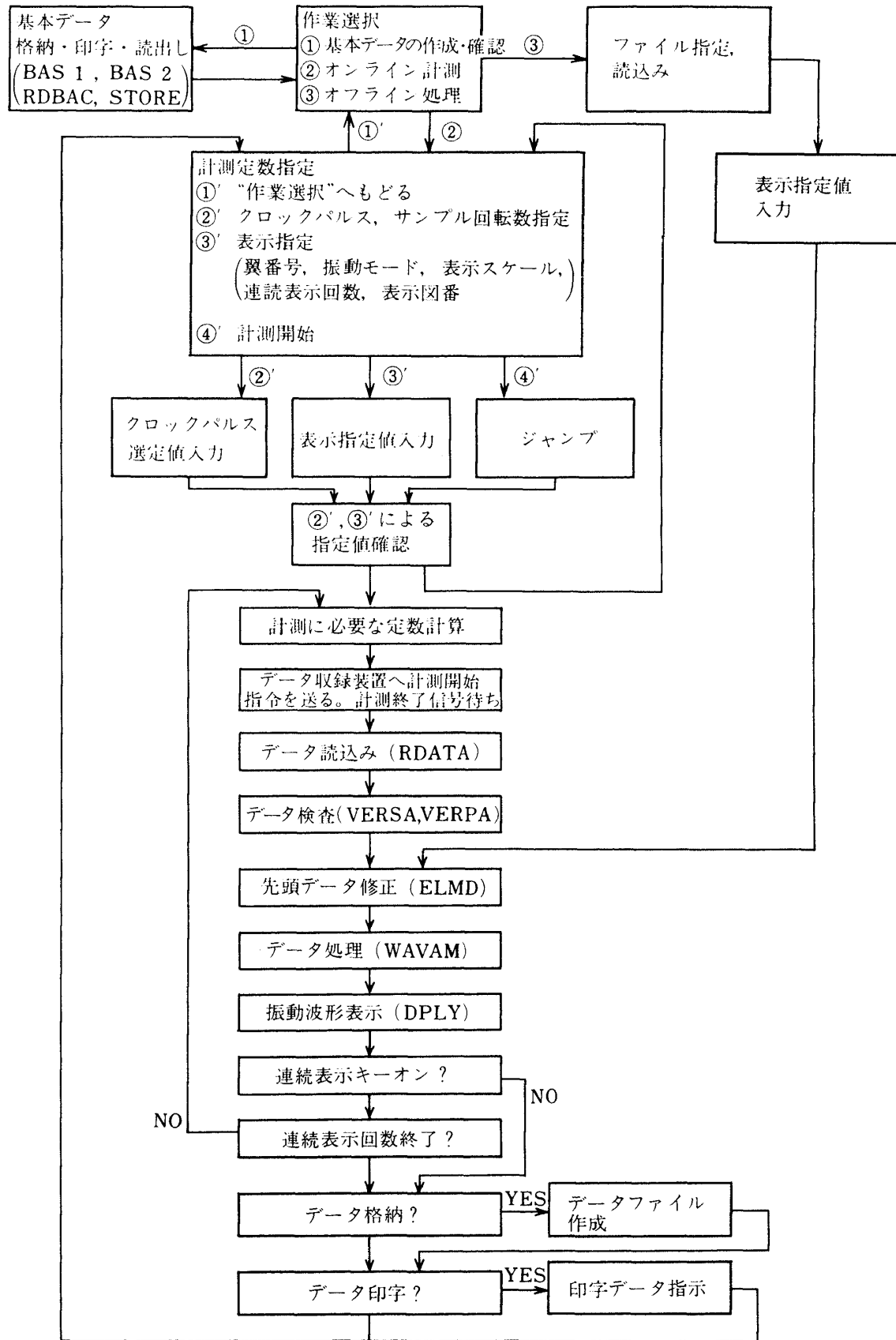


図 20 オンライン計測プログラムおよびオフライン処理プログラムの流れ図

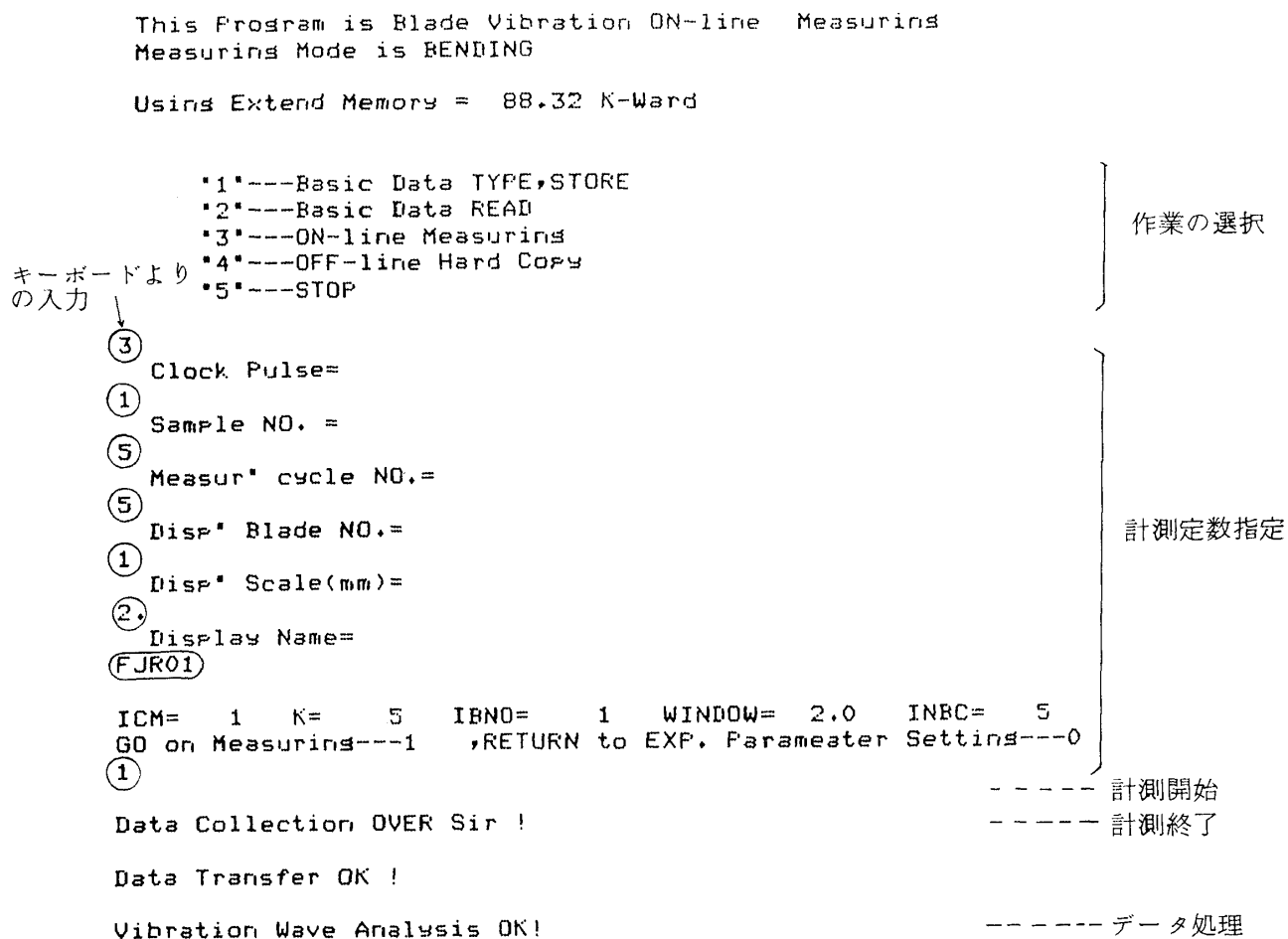


図 2 1 プログラム操作例

#### 4. 横風試験時における計測例

FJR 710/20 エンジンの横風試験は、図 2 2 に示すように風量  $240 \sim 180 \text{ m}^3/\text{s}$ 、風速  $10 \sim 60 \text{ m/s}$  の容量を有する送風装置により、エンジンの斜め方向から風を送り、その時のエンジンの性能の変化やファン動翼の振動を調べるものである。表 2 に実験項目を、また図 2 3 に実験の様子を示す。図 2 4 は本計測装置の配置を示す。S センサーはファンケーシング上に合計 50 個取付けた。光源装置はエンジン架台に取付け、データ収集装置は架台の直下に配置した。また、データ処理・表示装置は架台から  $30 \text{ m}$  離れた所にある計測室内に置いた。S センサーは図 2 5 に示すようにファンケーシング上に 2 列に設けた取付穴にセンサー先端をさし込み、止め金によっておさえ、さらに最大  $60 \text{ m/s}$  の風速に耐えるようにファンケーシング上 20ヶ所に取

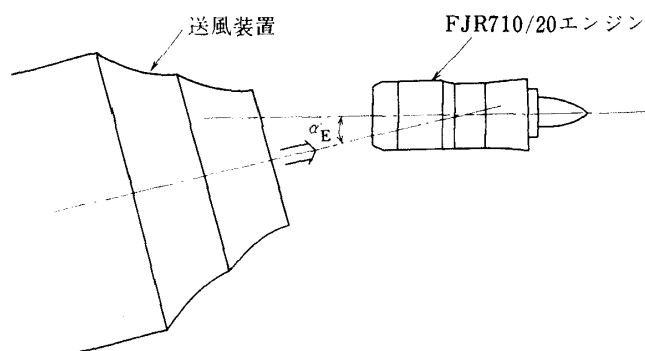


図 2 2 横風試験における送風機とエンジンの位置関係

付けたブラケット上に張った金網に固定した。図 26 に P センサーの取付け状況を示す。基準マークとしては、ファン 2 段目動翼のディスクの内側の表面上に黒い目印を付けたものと、回転釣合い試験用にディスクのフランジ上に設けた穴のうち軸対称な 2 個に取付けたボルトを用いた。ただし、2 個のうち 1

表2 横風試験の試験条件

試験番号	風速(m/s)	迎角 $\alpha_E$ (度)	横風成分 (m/s)
I-1	20	0	0.0
-2		7.0	2.5
-3		14.5	5.0
-4		22.0	7.5
-5		30.0	10.0
-6		38.5	12.5
-7		48.5	15.0
-8		61.0	17.5
-9			
II-1	40	0	0.0
-2		3.5	2.5
-3		7.0	5.0
-4		11.0	7.5
-5		14.5	10.0
-6		18.0	12.5
-7		22.0	15.0
-8		26.0	17.5
-9		30.0	20.0
III-1	60	0	0.0
-2		2.5	2.5
-3		5.0	5.0
-4		7.0	7.5
-5		9.5	10.0
-6		12.0	12.5
-7		14.5	15.0
-8		17.0	17.5
-9		19.5	20.0

個はPセンサーとボルトとの距離Yをじゅうぶんに大きくしてPセンサーが検出しないようにした。実験にはボルトを基準マークとし、 $\#2$  Pセンサーは予備とした。Y = 2 mmに設定した。

計測は表2に示す項目すべてについて行った。ただし、今回は曲げ振動のみを計測し、ねじりは無視できるものとした。したがってSセンサーとしては、図25に示すように2列に配置したが、実際に使用したのは曲げ振動測定用のエンジン前方側の1列(22個)である。曲げ振動測定用のSセンサーの円周上の配置状況を図27に示す。図はPセンサーが基準マークを検出した位置におけるSセンサーと

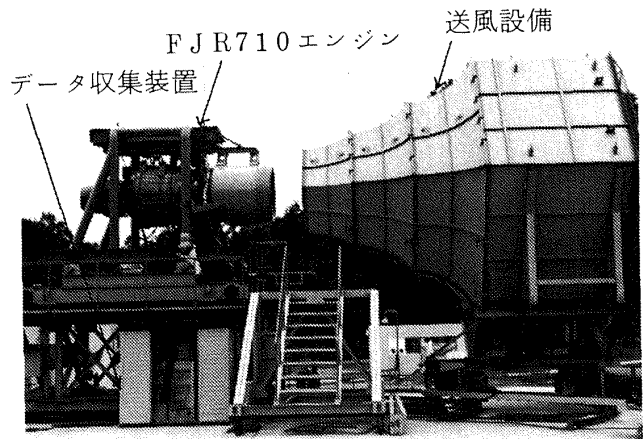


図2.3 横風試験

動翼の相対的位置関係を示す。図28にエンジンのモータリング時に測定した各センサーの光電変換器出力電圧を示す。これより、波形整形時のしきい値を約0.2 Vとした。この値は、昼光によるノイズレベル(約0.05 V)よりはるかに高いものである。エンジン回転数がより高いところでは動翼の伸びによってSセンサーと動翼先端との距離は小さくなり出力電圧は増すと考えられるが、一方、動翼が振動して先端の面がセンサーに対して傾くと出力電圧が小さくなることも考えられる。しかし、今回の実験では出力の小さいセンサー11によると思われるノイズが時折発生しただけで全体的に良好な計測ができた。FJR710のファン動翼は33枚あるが、これ等の動翼すべての2回転間の振動波形を求めて表示するために約20秒を必要とした。図29に表示されたデータの1例を示す。このようにオンライン計測時には、操作パネル上で指定した動翼の振動波形と、33枚各々の動翼についての2回転中の正の最大変位dmaxと負の最大変位dminとを結んだ振幅とが表示される。本実験における基準マトリクス $[\tau, \alpha, \beta]$ としては図30に示すキャンベル線図においても大きな振動が認められていない1580 rpmにおいて求めたものを使用した。次に試験データの例を示す。

図31, 32はファン回転速度に対する動翼の振動振幅と振動波形の変化の様子を示す。図31において破線のところはSセンサーを配置していないところである。回転速度2464 rpmのところは回転2次の共振点があり振動振幅が片振幅で約4 mmにな



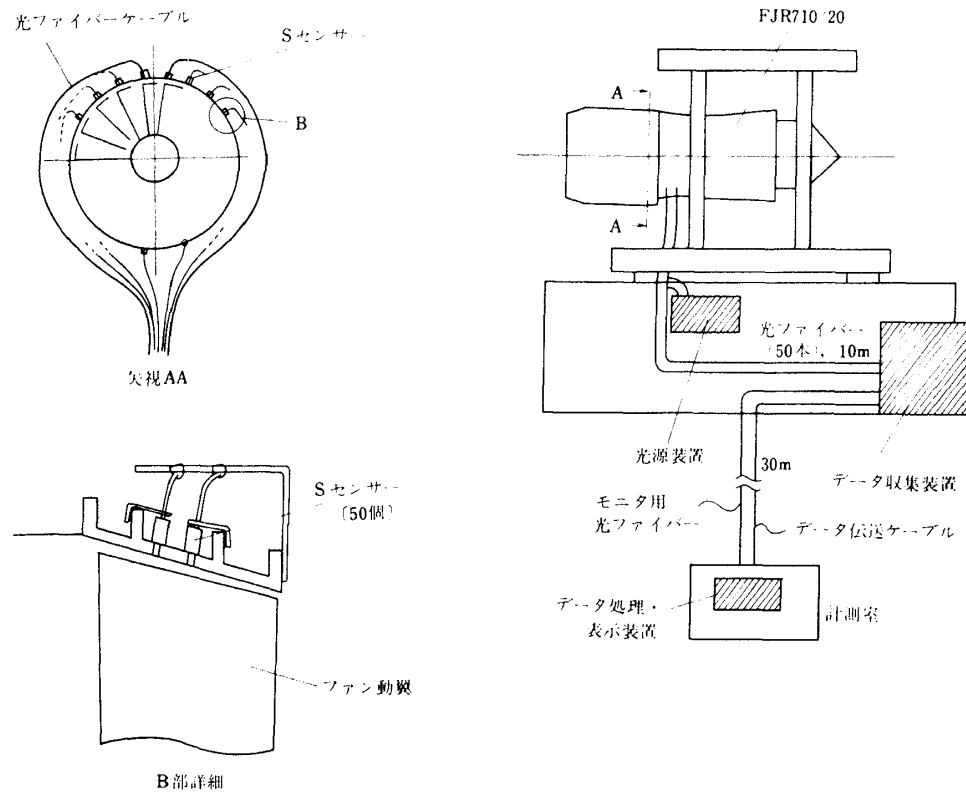


図 2 4 ファン動翼振動計測配置図

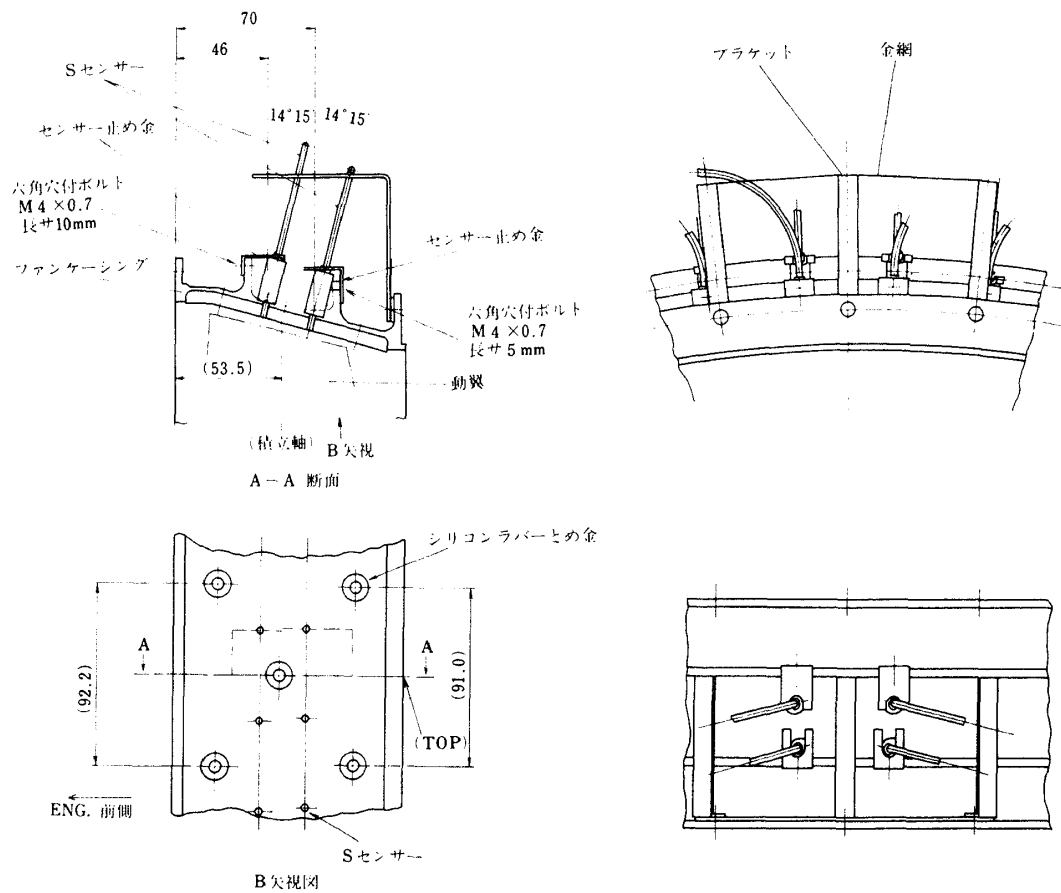


図 2 5 ファンケーシングへのセンサーの取付法

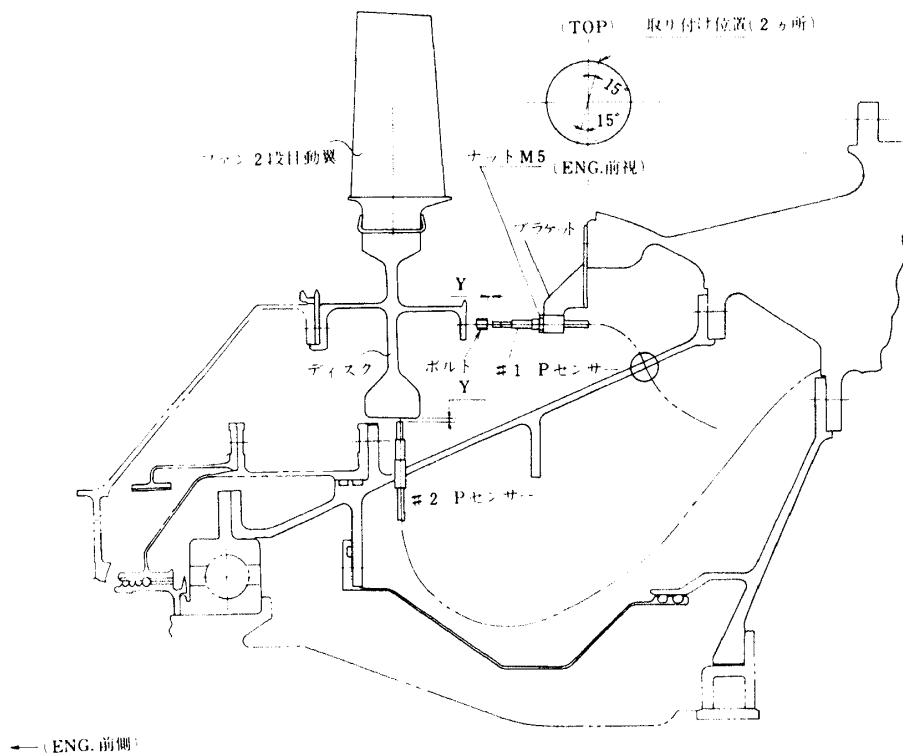


図 26 P センサーの取付状況

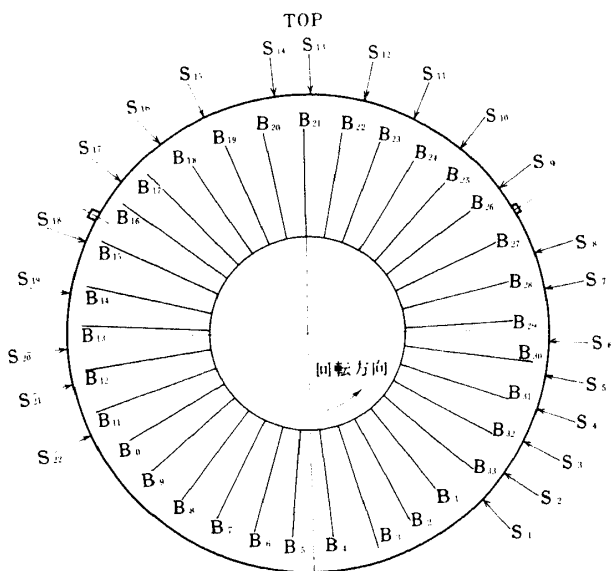


図 27 S センサーと動翼との相対的位置関係

っている。この場合の動翼の振動数は約82Hzである。図30のキャンベル線図からも2300rpm付近に回転2次の振動数約84Hzの共振点があり、ファン動翼のスナバ上 $L/10$  ( $L$ はスナバ上の翼の高さ)のところに貼付けたひずみゲージの出力がかな

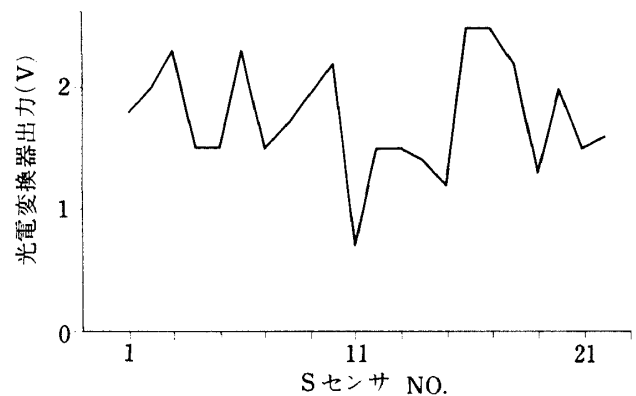


図 28 S センサーの出力電圧

り大きく(約 $240\mu$ )なっていることがわかる。一方、地上での動翼1枚についての振動試験によって動翼の根元からの1次曲げ振動数が80Hz近辺にあることが知られていることから、この振動はファン動翼のスナバより上の部分だけの振動ではなく、動翼の根元から振動しているものであると考えられる。他のファン回転速度においては、共振点からずれていることもあり、振動があまり大きくない。次に図33に横風の迎え角 $\alpha_E$ の影響を示す。フ

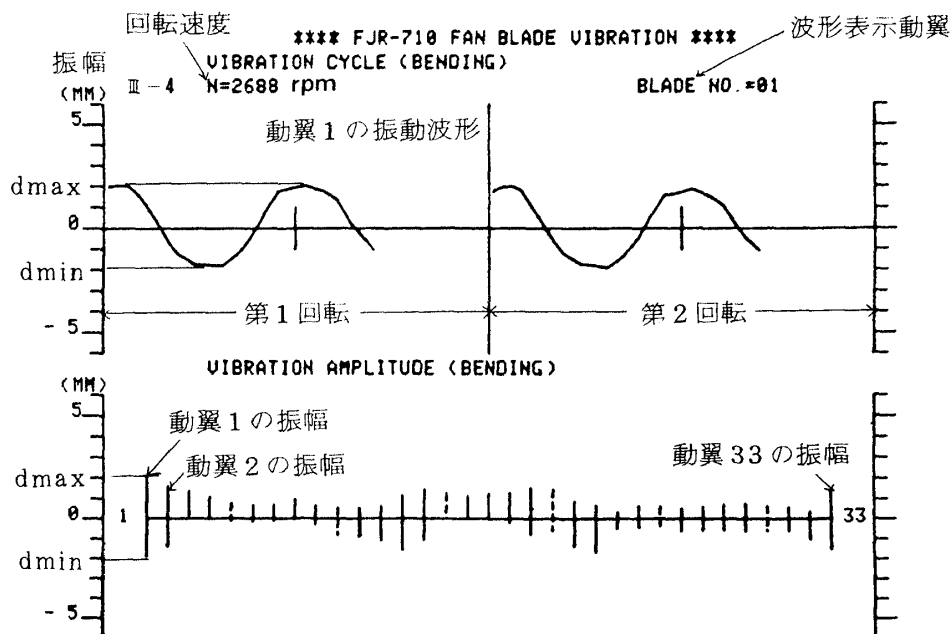


図 2 9 ファン動翼振動の表示例

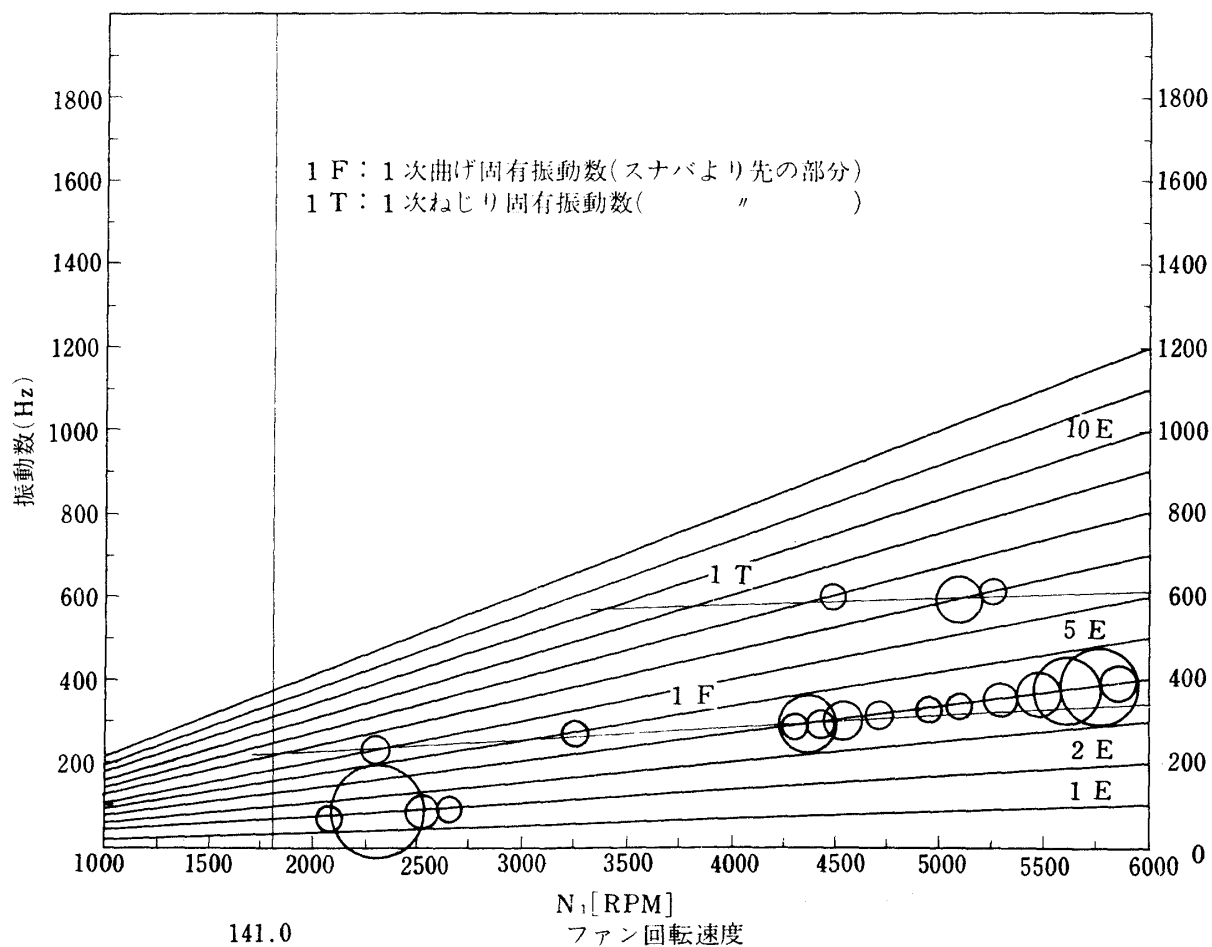


図 3 0 FJR710/20 ファン動翼のキャンベル線図

(スナバ上翼高の 10 %, 翼弦中央の翼背面上にひずみゲージを貼った場合)

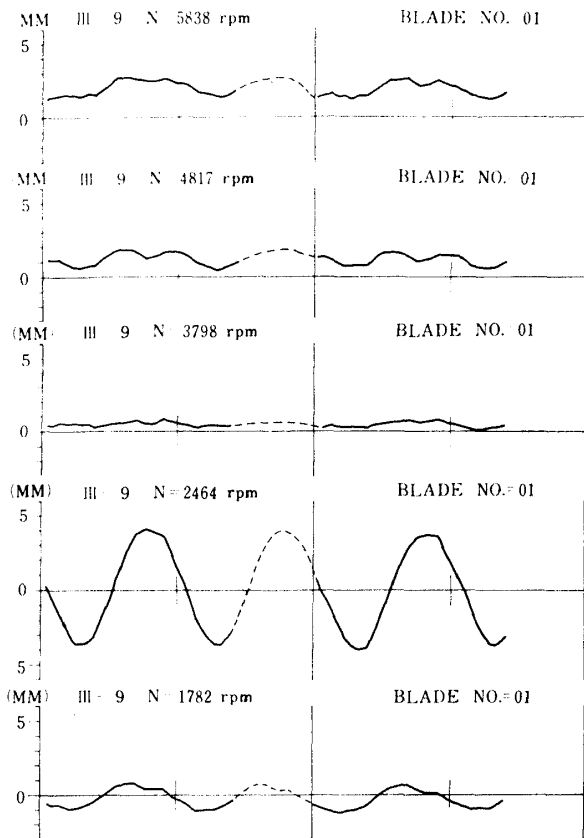


図 3 1 エンジン回転数と振動波形

ファン回転速度  $N_1 = 5900 \text{ rpm}$  近辺において  $\alpha_E = 0^\circ, 5^\circ, 12^\circ, 19.5^\circ$  とした場合の振幅および振動波形を比較するとほとんど変化が見られないことがわかる。これはファン入口に装備したダクト長がじゅうぶんで横風による入口空気流速の分布がファン入口に達する前に均一化されていることを示す。この傾向は、図 3 4 に示すように風速についても言える。風速が  $40 \text{ m/s}$  と  $60 \text{ m/s}$  のときでは、 $60 \text{ m/s}$  のときのほうがわずかながら振動振幅が大きくなっているにすぎない。

図 3 5 は振動中の各動翼相互の位相関係を示すものである。動翼 33, 7, 14 …… と位相が約  $90^\circ$  ずつおけていることがわかる。このことは図 2 7 を参照して考えれば明らかなように、円周上 2 ケ所に動翼の振動を引き起こす強制力のもととなる不均一な空気流の分布が存在し、その位置はケーシング等の静止部に固定されていることを意味する。

今回の実験ではひずみゲージを使用しなかったため本計測装置で計測した振動の精度について定量的な比較検討をすることができないが、以上の結果

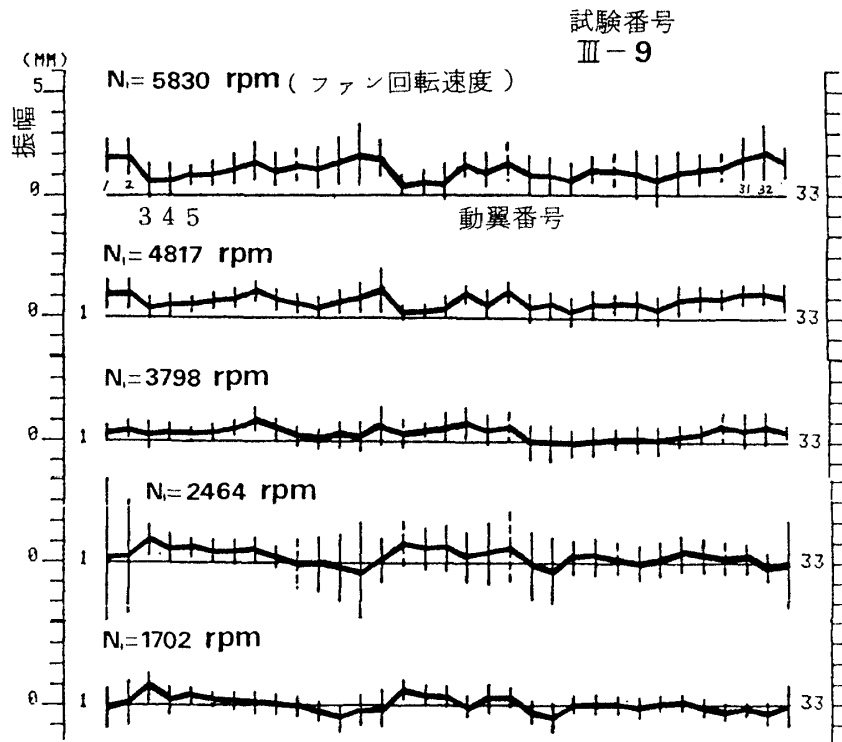
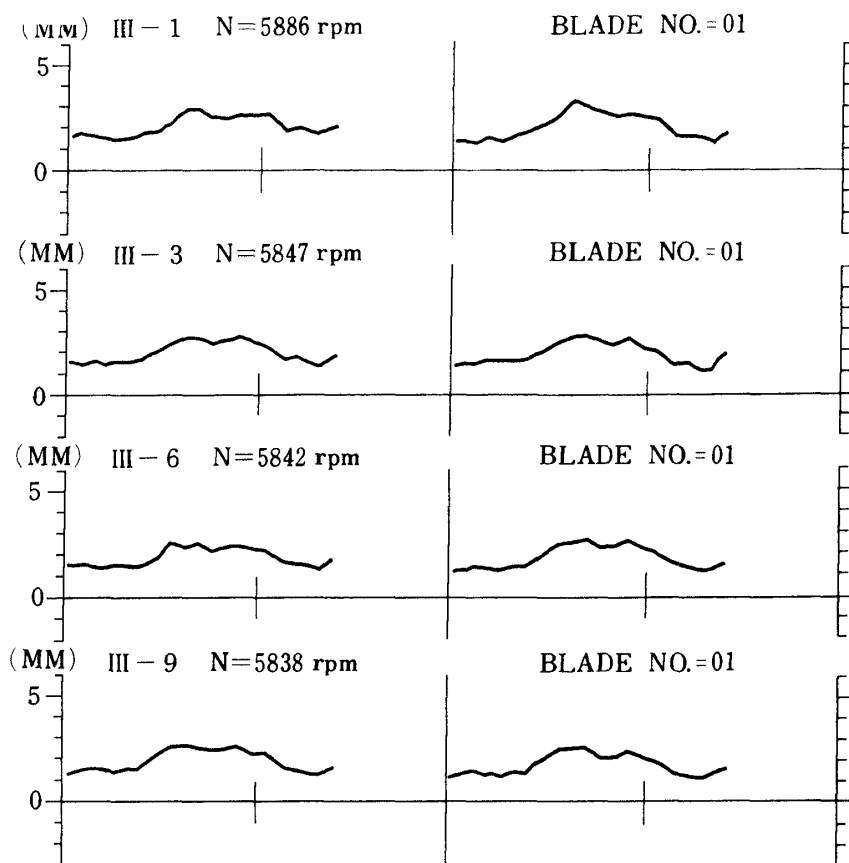
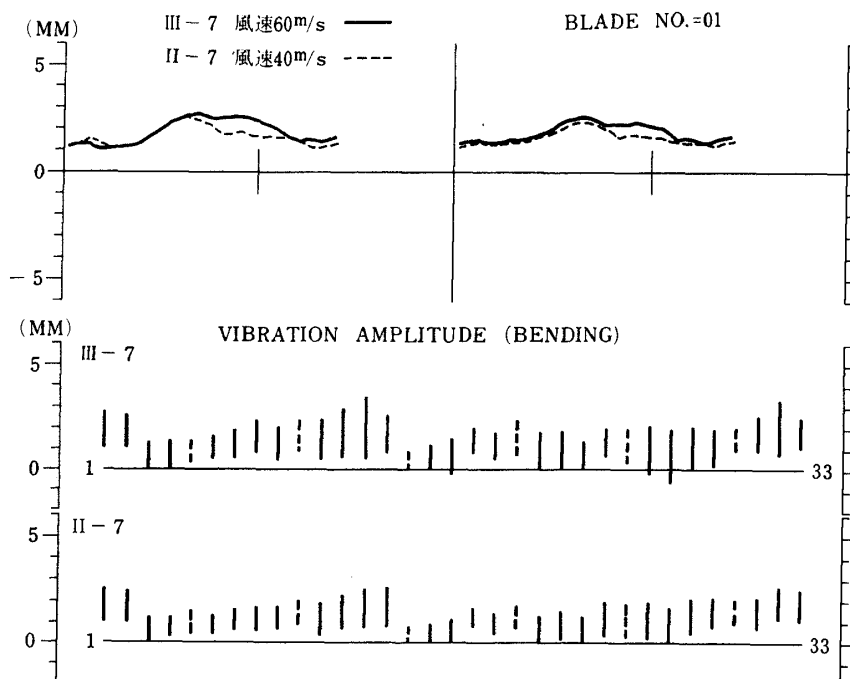


図 3 2 各回転数における各動翼の振動振幅

図 3 3 横風の迎角の  $\alpha_E$  の影響 (風速 60 m)図 3 4 風速の影響 (迎角  $22^\circ$ , エンジン回転数 5900 rpm)

からみても定性的には正しいデータが得られている  
と言える。なお、後日行った FJR エンジンのイン

レットディストーション試験時にひずみゲージによ  
る計測結果と比較検討したところ定量的にもよく一

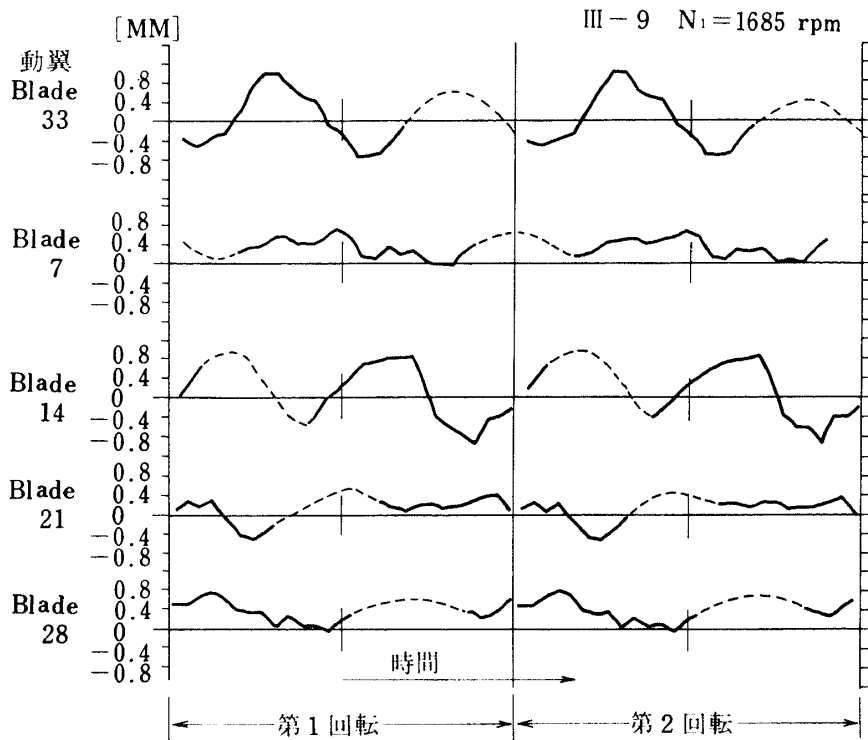


図 3 5 動翼相互間の位相関係

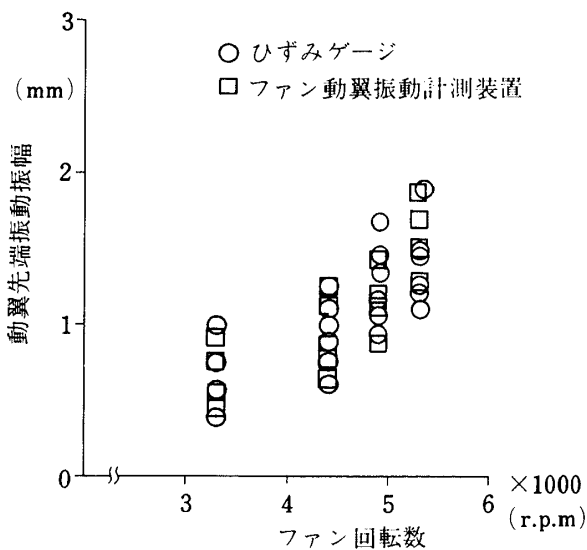


図 3 6 ファン動翼振動計測装置とひずみゲージによる動翼振動計測の比較  
(ひずみゲージによる応力計測値を図 5 に示す装置により得たキャリブレーション・データにより振動振幅に変換して示した。)

致していた。そのデータを図 3 6 に示す。

## 5. ま と め

航技研で研究開発した回転翼振動の非接触計測に

ついで新しい方法にもとづいて、FJR710エンジンの横風試験時にファン動翼の振動を計測するファン動翼振動計測装置を試作し、横風試験に使用した。その結果、横風を受けた状態での動翼の振動状態を明らかにすることができた。すなわち、FJR710/20 エンジンの動翼は今回の供試ナセル形式のものでは横風を受けた状態でも横風が無い状態とほとんど同じ振動範囲内にあることが明らかとなった。

末尾ながら本計測装置の試作ならびに横風試験の実施にあたり終始適切な御助言をいただいた鳥崎忠雄原動機部長にお礼を申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) 遠藤征紀, 松田幸雄, 松木正勝, “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, 計測自動制御学会, 日本機械学会, 日本自動制御協会主催
- 2) 松田幸雄, 遠藤征紀, 松木正勝, “回転翼振動の非接触計測法の研究(第II報)”, 日本機械学会講演論文集, 810-6

---

## 航空宇宙技術研究所資料471号

昭和57年9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 株式会社実業公報社  
東京都千代田区九段南4-2-12

---

**Printed in Japan**