

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-475

圧力測定系における管の応答特性

菊地 一雄 ・ 柳沢 三憲

1982年10月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

圧力測定系における管の応答特性*

菊地 一雄** 柳沢 三憲**

Response Characteristics of Tubes for Pressure Measuring System

Kazuo KIKUCHI and Mitsunori YANAGIZAWA

ABSTRACT

A measuring technique using tubes and scanning valves was developed by Bergh and Tijdeman at NLR in the Netherlands. The theoretical and experimental results are presented in Reference 1. This report describes the results of measurement of the dynamic response of tubes for the unsteady pressure measuring system used on an oscillating wing. In order to measure the dynamic response of the system, a device was developed which uses a pressure pulsator consisting of a motor-driven sine-wave cam and an air jet. The two sinusoidal signals of fluctuation pressure at both ends of the tube were analysed by the program of a Complex Fast Fourier Transformation (FFT). This method turned out to be a much simpler way to measure the response characteristics of the system than the NLR method. The response characteristics of pressure measuring systems with different tube lengths of a certain tube radius for the D type scanning valve were obtained. The experimental results agreed well with the theoretical ones.

1. ま え が き

三次元翼の非定常特性を調べるには、グローバルな空力特性である動安定微係数等を測定する場合と局所的な現象に注目して翼面上の非定常圧力を測定する場合とがある。本方法はチューブ・スキヤニーバルブ方式と呼ばれるもので後者の非定常圧力を測定するのに用いるためオランダの航空研究所(N.L.R.)で最初に開発、研究された。

三次元翼面上に圧力孔を翼弦方向に11点、翼幅方向に4列、裏面に9点を装着すると合計53点にもなる。これらの測定点すべての応答の速い埋込み型の圧力変換器を用い直接に測定することが望ましいが、そのためには高価な変換器や増幅器等が多数

必要となり予算的に困難である。そこで翼面上のある参照点を1, 2点選び直接埋込み型の変換器を用い、他点は管でスキヤニーバルブに接続し、参照点における振幅と位相の補正係数を全点に掛けることにより翼面上の変動圧力を得る方式を採用した。それには、あらかじめ管の伝達関数を求めてその周波数特性を知っておく必要がある。

本実験に用いたビニールチューブは通常D型スキヤニーバルブと呼ばれるものに合う内径1.1mmφのものを使用した。

2. 記 号

- A_1 : 流路の断面積
- A_2 : 変動間隙
- A_3 : 変動間隙の定常分
- A_4 : 変動間隙の変動分

* 昭和57年6月21日受付

** 空気力学第一部

a_0 : 音速	T : サンプリングの時間 $T = \Delta t \cdot N$
b : ノズルの幅	t : 時間
C_p : 定圧比熱	Δt : サンプリング周期 $\Delta t = \frac{1}{2W}$
f : 周波数	V : 流速
$G(f)$: 利得 $G(f) = G_R + i G_I$	V_v : 変換器の体積
G_R : 利得の実数部	V_t : 管の体積 $V_t = \pi R^2 L$
G_I : 利得の虚数部	W : 最高周波数
$ G $: 利得の振巾	$X(f)$: Fourier 変換値
g : 重力の加速度	X_1 : 矩形断面の b/h により決められた定数
h : ノズルの高さ	$x(t)$: 入力側アナログ信号
h_l : 流路長による圧力損失	$x_s(t)$: サンプリング値
h_s : 断面積変化による圧力損失	Γ : 円管を通る圧力波の伝播定数
i : 虚数の単位	γ : 比熱比 $\gamma = C_p / C_v$
J_0 : 0 オーダの第 1 種 Bessel 関数	δ : Dirac のデルタ関数
J_2 : 2nd オーダの第 1 種 Bessel 関数	ζ_1 : 損失係数
L : 管の長さ	λ : 熱伝導率
l : ノズルの長さ	λ_1 : 管の摩擦係数
l_1 : ノズルの出口から P 点までの長さ	μ : 空気の粘性係数
M : 2 にかかる指数 $N = 2^M$	ν : 動粘性係数
m : 整数	ρ_s : 空気の密度
m_1 : 流体の平均深さ	σ : Prandtl 数の平方根
N : サンプル値の個数	φ : 位相差
n : 管の Polytropic 定数	ω : 角振動数 $\omega = 2\pi f$
n_1 : 整数	
n_v : 変換器の容積の Polytropic 定数	
P : P 点の圧力	
P_i : 入力側の変動圧力	
P_u : 出力側の変動圧力	
P_s : 平均圧力	
P_R : リザーバの圧力	
P_{out} : ノズルの出口の圧力	
R : 管の半径	
R_e : レイノルズ数	
S : Shear wave number	

3. 理論式

オランダの NLR では早くから管の特性が系統的に調べられていた。文献(1)によれば、図 1 に示すような単一の管の終端に体積 V_v の圧力変換器が付いた構造では、次のような理論式が成立つ。

$$\frac{P_u}{P_i} = \left[\cosh \left(\frac{\omega L}{a_0} \Gamma \right) + \frac{V_v n}{V_t n_v} \left(\frac{\omega L}{a_0} \Gamma \right) \cdot \sinh \left(\frac{\omega L}{a_0} \Gamma \right) \right]^{-1} \quad (1)$$

ここに

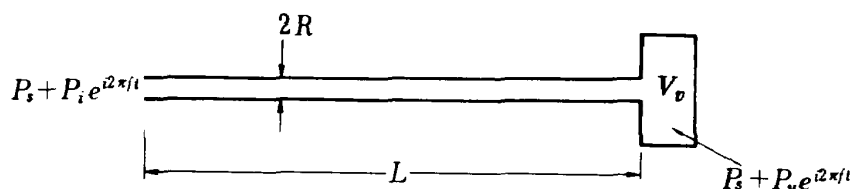


図 1 管と圧力変換器の概念図

$$\Gamma = \sqrt{\frac{J_0(i^{\frac{3}{2}}S)}{J_2(i^{\frac{3}{2}}S)}} \sqrt{\frac{\gamma}{n}}$$

$$n = \left[1 + \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{J_2(i^{\frac{3}{2}}\sigma S)}{J_0(i^{\frac{3}{2}}\sigma S)} \right]^{-1}$$

$$S = R \left(\frac{\rho_s \omega}{\mu} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Shear wave number}$$

$$\sigma = \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Prandtl 数の平方根}$$

$$n_p = 1.0 \sim 1.4 \quad \text{Polytropic 定数}$$

$$a_0 = \sqrt{\frac{\gamma P_s}{\rho_s}} \quad \text{音速}$$

しかし、スキャニバルブに接続した場合、変換器の体積 V_v や管の半径 R を正確に測定することが実際上難しい。そこで(1)式に V_v , n_p , R の近似値を入れて計算を行い共振周波数が実験値と一致するように、これらの値を修正した。

4. 管の周波数特性の測定方法

本測定方法はオランダのNLRの方法を参考に新たに開発した方法で非常に簡単で安価である。しかし、電子計算機のプログラム上で工夫を凝らし、大量のデータの周波数解析を行い重ね合わせる方法により測定点の分散の小さいデータが得られるようにし

た。

図3に示すように、空気源から圧力調整弁を通して空気をノズルへ流し、ノズルの先端で正弦波状のカムを回転させる。従って、その間隙は正弦的に変化する⁶⁾。付録2に示すように管の抵抗とノズルの出口の抵抗係数を考えれば流路の断面積変化によって、ノズルの管壁に正弦的な変動圧が発生することが概算として分かる。カムはモータにより駆動され、モータに供給する電圧はスライダックで変化させ、カムの回転数を変える。カムは一周に24波長形成されており、電圧の変化だけで50Hzから2000Hzぐら

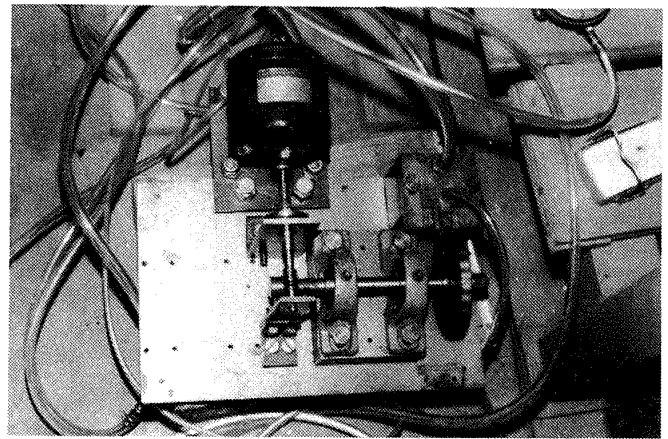


図2 変動圧力発生装置（低速状態の機構）

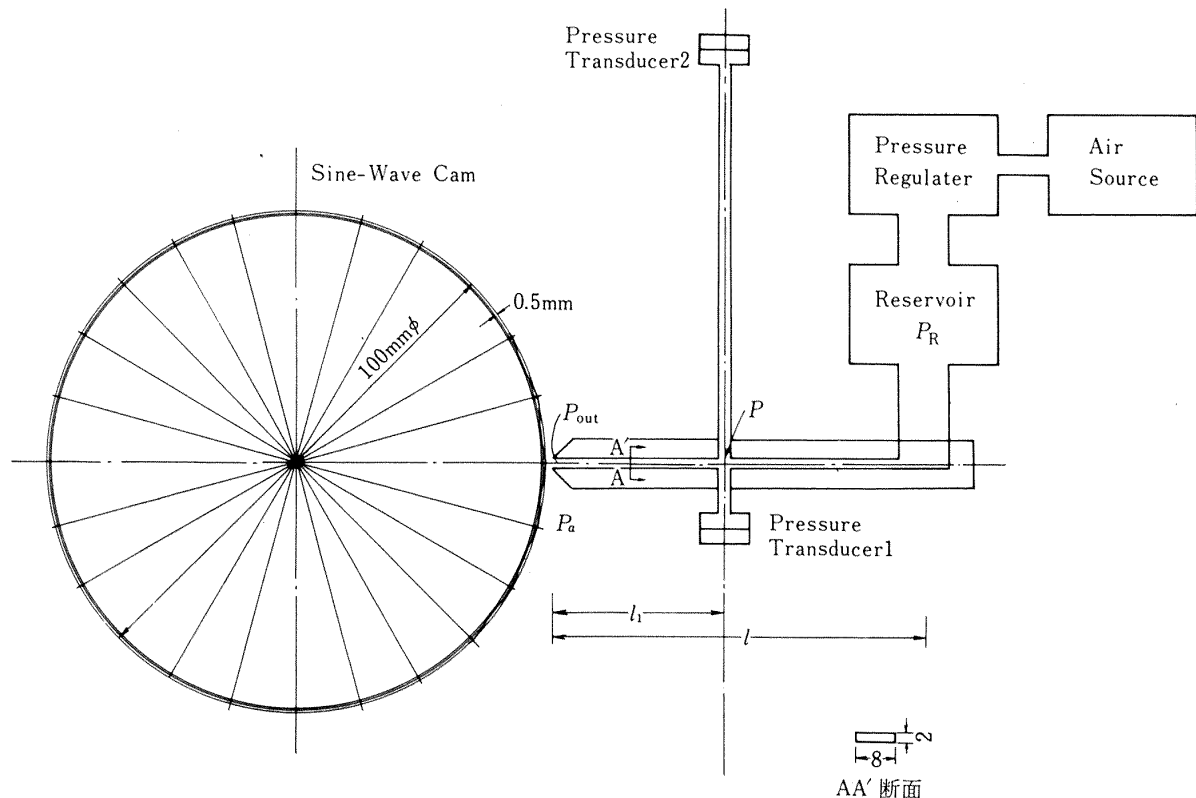


図3 変動圧力発生装置のブロック線図

この範囲を変えることが出来る。さらに低い周波数を得るにはウォームギヤを用いて回転数を下げると 1Hz から 70Hz の範囲の変動圧力を発生させることができる。図 2 は低速の場合の機構の写真である。この変動圧力を長さ L 、半径 R のビニールチューブに導びき、図 3 に示すようにビニールチューブの終端側および発生機構に圧力変換器を接続する。2 個の圧力変換器*からの出力はデータレコーダに記録され、オフラインで電子計算機により解析される。

図 4 のブロック線図で示されるように、これらの 2 つの出力は 2 ch のデータとして、同時に高速 A/D 変換器によりデジタル量に変換され、演算処理装置に取り込まれる。この時、2 ch のデータの同時性を保障するためサンプリングホールドをかけて A/D 変換を行った。データはバッファ単位でコアメモ

リーにストアされ、バッファ・フルの状態になると MT-1 に転送される。バッファは 2 個用意されて、連続的に A/D 変換できる。MT-1 のデータは編集して MT-2 に転送する。MT-2 の磁気テープは一次編集テープとして、FACOM-230-75 システムによってコード変換が行われ、変換後のデータはファイルにストアされる。

5. 解析方法

次にデータファイルおよびカードデータを入力として高速フーリエ変換を行い、振幅比 G と位相差 ϕ を求める。

今、入力信号が $x(t)$ で与えられる時、そのフーリエ変換は次式で表わされる。

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (2)$$

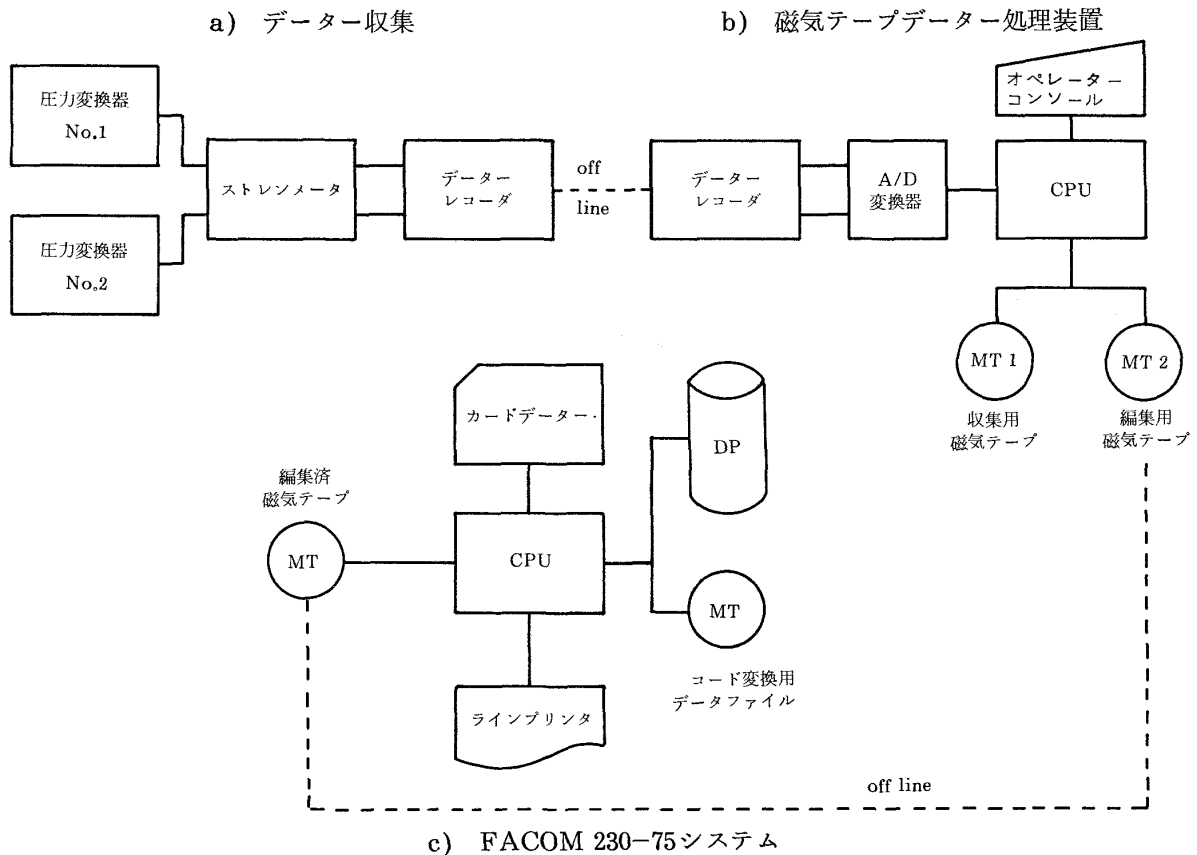


図 4 データ解析ブロック線図

* 図 6 から図 9 では 2 個の圧力変換器は共和 PS-2KB を用い、スキャニバルブは用いていない。付録 3 を参照のこと。図 5 と図 10 では、実際に風洞試験を行った翼に装着した状態で、管の特性試験を行ったデータである。従って、埋込み型の圧力変換器は Entran Devices 社の研式 EPI-080-25 を用い、管の終端にはスキャニバルブを通して Druck 社型式 PDCR22 を用いた。

圧力変換器 1, 2 の信号をそれぞれ $x_1(t)$, $x_2(t)$ とすれば, 振幅比 $|G|$ および位相差 φ は次のようになる。

$$G(f) = \frac{X_2(f)}{X_1(f)} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x_2(t) e^{-i2\pi ft} dt}{\int_{-\infty}^{\infty} x_1(t) e^{-i2\pi ft} dt} \quad (3)$$

$$G(f) = G_R + iG_I \quad (4)$$

とすると

$$|G| \equiv \left| \frac{P_u}{P_i} \right| = \sqrt{G_R^2 + G_I^2} \quad (5)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{G_I}{G_R} \right) \quad (6)$$

得られた入力信号をサンプリング周期 Δt で標本化するとき, 標本化した信号がもとの信号の性質を失わないためには次の条件が必要である。

- (1) $x(t)$ の周波数成分が W Hz 以下であり,
- (2) $x(t)$ の信号をサンプリングする周期 Δt が $1/(2W)$ sec 以下であること。

ここに W Hz は信号に含まれる最高周波数である。これを満足するサンプル値を

$$x_s(t) = x(t) \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \delta(t - n_1 \Delta t)^* \quad (7)$$

とすれば

$$\begin{aligned} X(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ x(t) \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \delta(t - n_1 \Delta t) \right\} \\ &\quad \cdot e^{-i2\pi ft} dt \\ &= \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ x(t) e^{-i2\pi ft} \right\} \delta(t - n_1 \Delta t) \\ &\quad \cdot dt \\ &= \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} x(n_1 \Delta t) e^{-i2\pi f n_1 \Delta t} \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式は時間について無限の長さを必要とするので, そのかわりに $1/(2W)$ に比べて十分に長い時間 T をとれば, $2\pi f = 2\pi m/T$ ($m=0, 1, 2, \dots, N-1$) となる。よって(8)式は次のようになる。

$$X\left(\frac{m}{T}\right) = \sum_{n_1=0}^{N-1} x(n_1 \Delta t) e^{-i2\pi \left(\frac{m}{T}\right) n_1 \Delta t} \quad (9)$$

$T/\Delta t = N$ であるから

$$X\left(\frac{m}{T}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n_1 \Delta t) e^{-i\left(\frac{2\pi}{N}\right) m n_1} \quad (10)$$

(10)式により $1/T$ Hz ごとの離散的フーリエ変換ができる。

この方法をそのまま使用すると m, n について N 回ずつの演算が必要のため, 合計 N^2 回の演算を行わなければならない。したがって, N が多くなると計算時間が非常に長くなる。これを避けるために実際のデータ解析は高速フーリエ変換 (FFT) 法によって行った。FFT法の演算回数は, $N = 2^M$ とすれば, $2N \log_2 N = 2NM$ となる。よって両方法の演算回数の比は $N^2/2NM = N/2M$ となる。例えば, $N = 512$ とすれば FFT法は約 28 倍速い⁴⁾

実際のデータ解析では, このFFT法で得られた値を何回も重ね合わせ等を行い, 最終的に得られる実験値は分散の小さいデータにする必要がある。本方法では1回のFFT法で得られた値の振幅の最高値のみを採用し, FFTの解析を順次行い, この最高値における値の重ね合わせをプロットすることで分散の非常に小さいデータが得られた。さらに詳しく述べると, 本方法ではパルス発生器の機構上可能な最低周波数から最高周波数まで手動で掃引した。周波数範囲は1Hzから70Hzおよび50Hzから2000Hzまでの2種類で, 掃引時間は約60秒, 掃引回数は5回である。圧力変換器のNo.1, No.2の信号は最高周波数70Hzの場合, サンプリングタイム2msec また最高周波数2000Hzの場合0.5msecでA/D変換される。このデータを各512個ずつ区切りFFT解析を行い, 管の入力側の信号(No.1)の振巾の最大値を探す。この最大値に対応する周波数及び2個の圧力変換器のFFT解析値を保存しておく。この手順を繰返し行い全データを解析した後, 保存しておいた解析値を各周波数ごとに重ね合わせて平均値を求めた。この値を測定値として図10の○印で示した。

1回のFFT解析から最大振幅に対応する周波数

* δ は Dirac のデルタ関数で $\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \delta(t - t_0) dt = x(t_0)$ である。

のデータのみを取り出すことは1区切りのデータに対応する時間の間に圧力の周波数が変化しないことを仮定している。

次の章で実例について説明する。

6. 測定結果および考察

図5はFFT法の解析結果を如何に処理するかによって、その分散値を小さくすることが出来るかを示した図である。この例は周波数1Hzから70Hzの解析結果である。先ず、△印は通常のFFTを290回繰返し解析し、その全てを重ね合わせた値である。分散はある程度減少している。次に、1回のFFT法では入力側の振幅の最高値における振幅比と位相差を採用し、これを繰返し行い重ね合わせる。すなわち、入力側のカムによって発生した実際の変動圧力の周波数のみを採用することで、分散が非常に小さくなっている。(○印) 以下の測定値はこの方法によって得られた値である。

試験にはD型スキューバルブに使用する内径1.1mmφのビニールチューブを用いた。チューブの長さは550, 1000, 1500, 2000mmの4種類で、その結果を図6から図9に示した。横軸に周波数 f 、縦軸に振幅比 $|G|$ および位相差 ϕ をプロットした。図6はチューブの長さ $L=550$ mm、変換器体積 $V_v=28.3$ mm³、チューブの半径 $R=0.55$ mmの場合の周波数特性を示した図である。これらの図は微小変動圧の仮定が成立つ様に供給圧力を0.1kg/cm²以下になるようにし、変動圧力の振幅は0.06kg/cm²以下で測定を行った。 $L=550$ mmの場合、115Hzの付近で共振しており振幅が最大となっている。この付近では測定値の方がやや小さい値を示している。このずれは入力側の変動圧力に依存し、振幅を0.1kg/cm²以上にするとピーク値は約1.5の値を示し低くなる。この現象は恐らく粘性の影響と考えられる。

図7は $L=1000$ mmにした場合の特性である。この場合は振幅と位相ともに全域にわたって良く一致している。共振周波数は約60Hzの付近である。

次に図8は $L=1500$ mmにした場合の特性であるが共振周波数は35Hzの付近にある。したがって、位相差も大きくなり、50Hzで2rad程度に達している。翼面上の非常圧力を測定するにはこの長さ

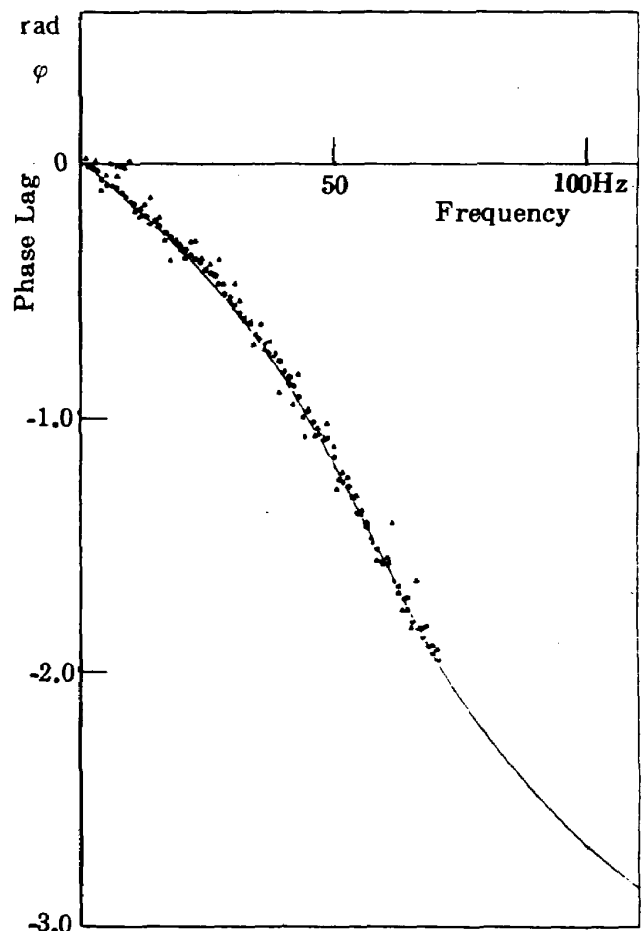
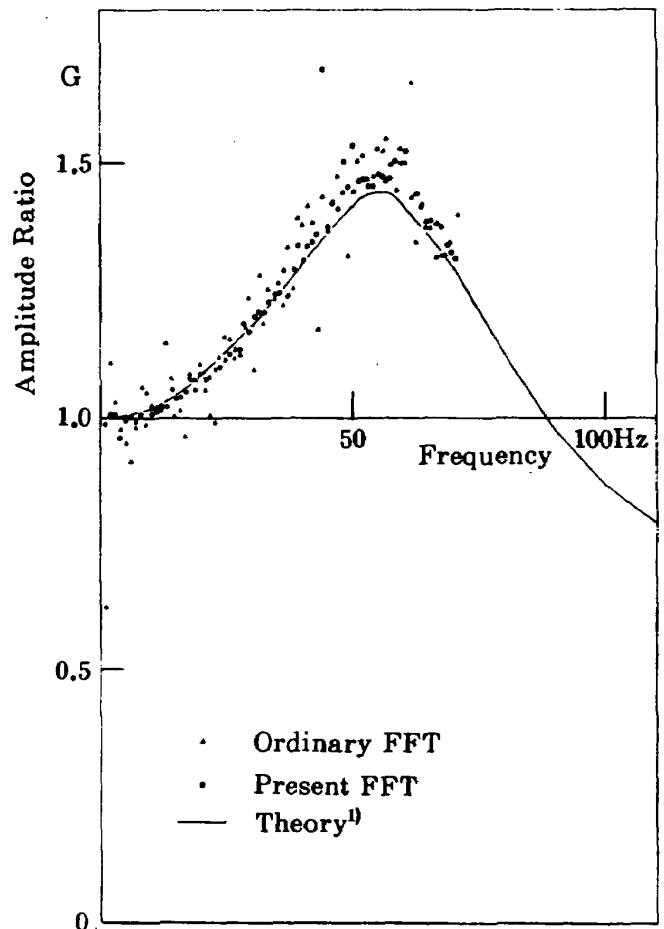


図5 FFTのデータ解析方法の違いによる分散

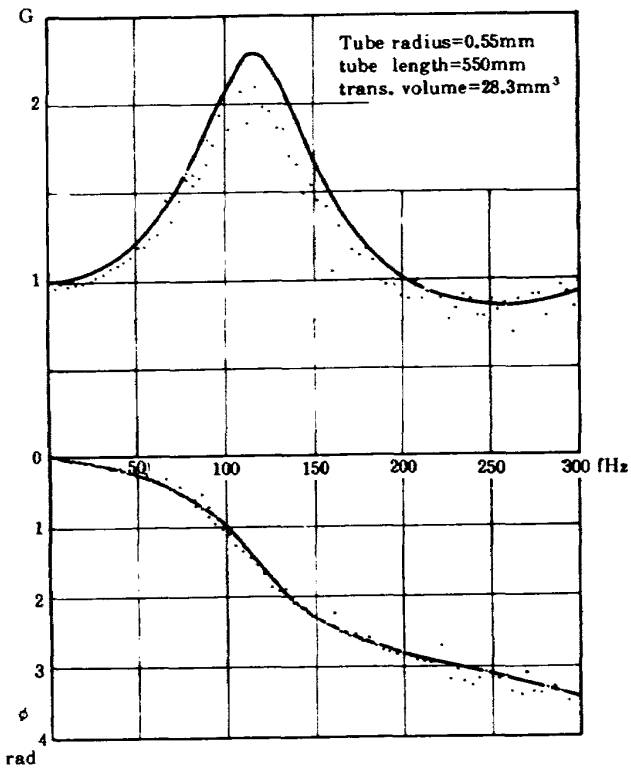


図6 管の周波数応答 ($L = 550\text{mm}$)

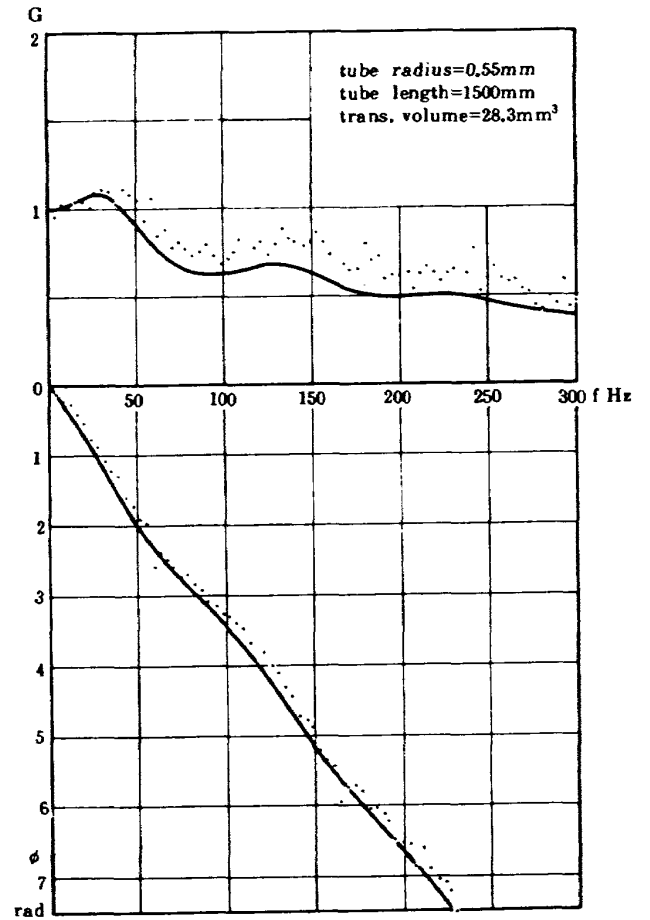


図8 管の周波数応答 ($L = 1500\text{mm}$)

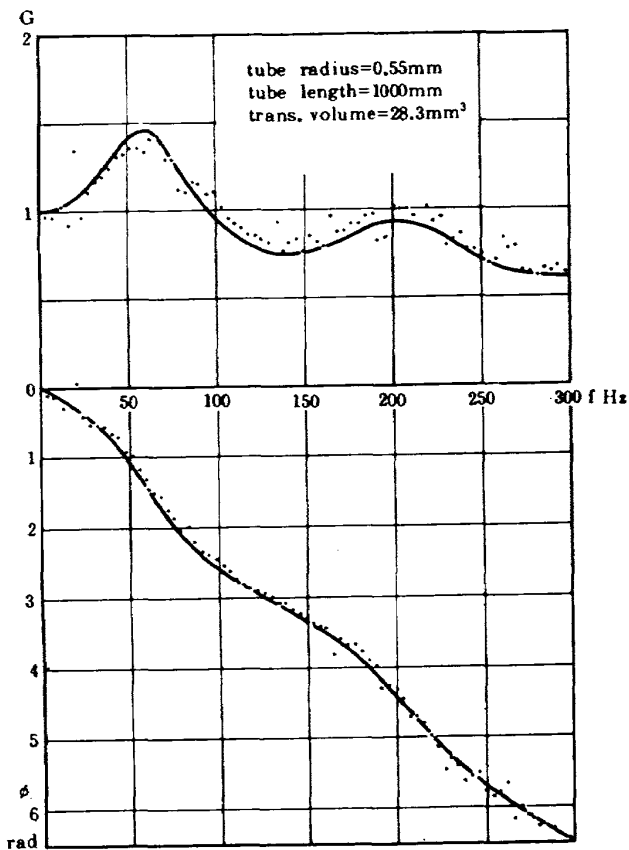


図7 管の周波数応答 ($L = 1000\text{mm}$)

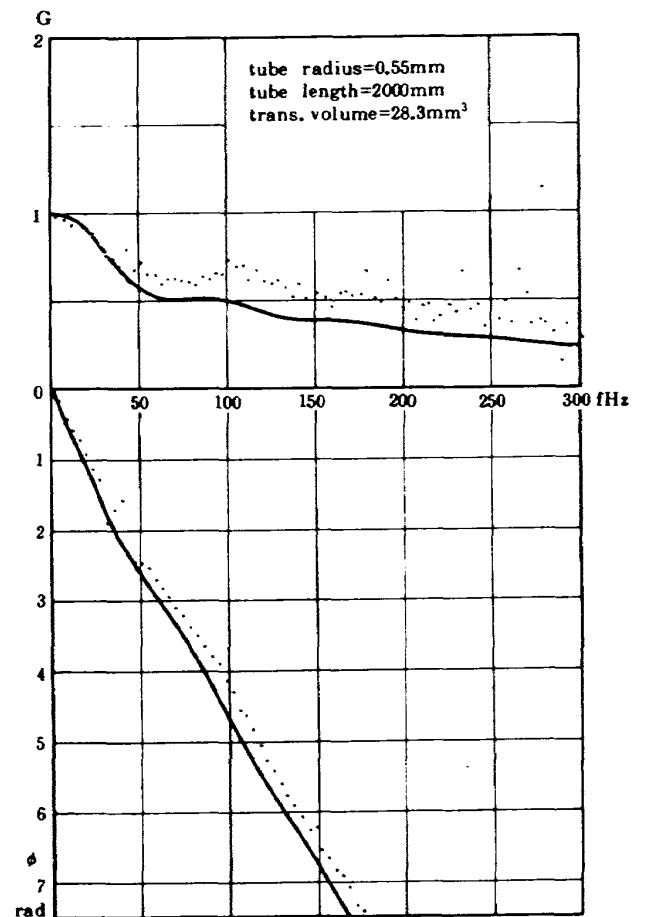


図9 管の周波数応答 ($L = 2000\text{mm}$)

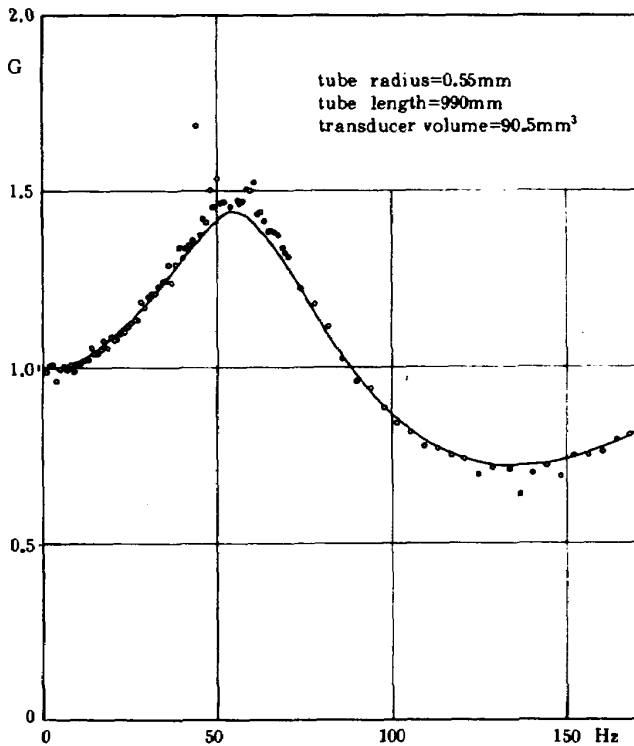


図 10 a 三次元翼模型に装着した管の周波数応答、振幅比

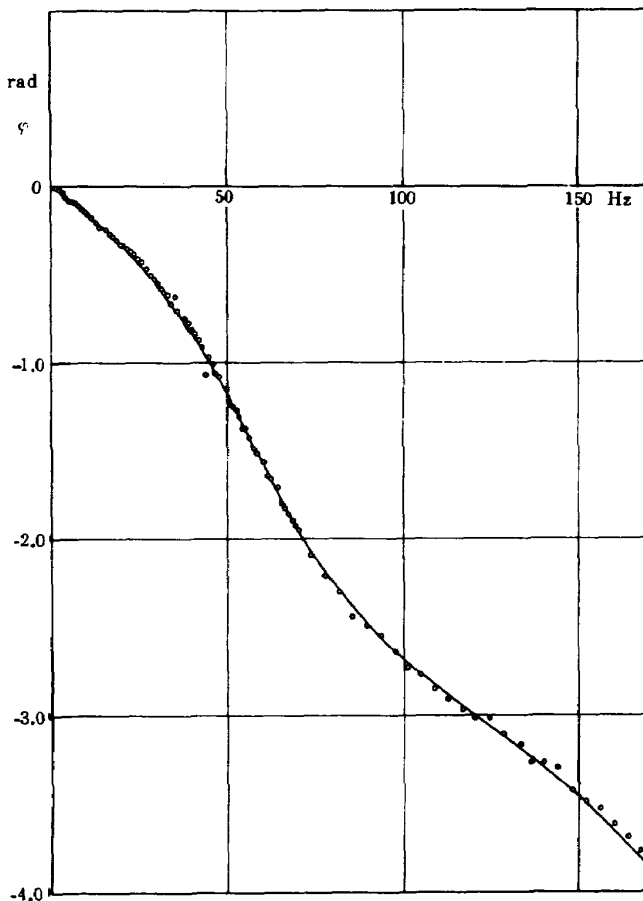


図 10 b 三次元翼横型に装着した管の周波数応答、位相差

が限界のようである。参考のために $L = 2000\text{mm}$ にした場合の特性を図 9 に示した。この長さでは粘性項が卓越しもはやピーク値が現われないで、振幅比 G は 0Hz からすぐに減少する傾向にある。位相差も非常に大きくなっている。これらの特性は、周波数の高い範囲でややずれているが、振幅比および位相差ともに(1)式は非常に良く表現している。図 10 は実際に三次元振動翼に装着した状態で管の動特性を測定したものである。図 10 a は周波数に対する振幅比をプロットした。また図 10 b は周波数に対する位相差をプロットしたもので実線は理論値であり、○印は測定値である。(1)式は管の周波数特性を良く表わしているが、実際には変換器の体積 V_p 、管の半径 R 、Polytropic の定数 n_p を正確に見積ることは困難である。そこで、測定値と理論値の比較は(1)式における V_p を各管の長さの共振周波数が一致するように選んで計算した。すなわち、 $R = 0.55\text{mm}$ 、 $V_p = 28.3\text{mm}^3$ 、 $n_p = 1.4$ と仮定したときの計算値である。 n_p は変換器の体積内における気体の状態変化を表わす定数である。断熱変化の場合は $n_p = 1.4$ であり、等温変化の場合は $n_p = 1.0$ である。実際には中間的な状態変化をすると考えられる。しかし、この影響は V_p や R に比べて小さいので、 V_p と R の測定を正確に行えば周波数応答はある程度予測することができる。

次に平均圧力および変動圧力の振幅が大きい場合、粘性の影響が強くなり、共振点付近で利得および位相ともに理論値からずれてくる。さらに気流中における測定では管内への気体の流入、流出により、主流に擾乱を与えることを考慮しなければならない。^{2),3)}

実際の振動翼面上の測定では、この静止空気中の管の応答特性は直接補正に用いず、直接埋込み型変換器との比較によって補正を行っている。

6. ま と め

これらの試験結果から次のことが言える。

- 1) Tijdeman の解析した(1)式はチューブの周波数特性を良く表わしている。
- 2) D型スキヤニーバルブ用のビニール・チューブの周波数特性を測定した結果、 50Hz 以下の非

定常圧力を測定する場合、管の長さは1000mm以下にするのが適当であることが分かった。

- 3) この変動圧力発生装置と5章で述べた解析法によりチューブの周波数特性が簡単にしかも精度良く測定することができた。

本報告は非定常圧力分布の測定によく用いられるD型スキューバルブとそれに接続されるビニール・チューブの寸法に合わせてその周波数特性を測定し、計算を行った。将来この方法で測定される方々の参考にしてもらえれば幸いである。

参 考 文 献

- 1) Bergh, H. and Tijdeman, H.; Theoretical and Experimental Results for the Dynamic Response of Pressure Measuring Systems, Report NLR-TR F.238.
- 2) Tijdeman, H.; Investigations of the Transonic around Oscillating Airfoils, NLR-TR 77090U.
- 3) Tijdeman, H. and Bergh, H.; The Influence of the Main Flow on the Transfer Function of Tube-Transducer Systems used for Unsteady Pressure Measurements, NLR-MP 72023U.
- 4) Bendat, J. S. and Piersol, A. G., 得丸英勝訳, ランダムデータの統計的処理, 培風館.
- 5) Roberts, J. B., Surry, D. and Johnson, R. F.; Some Experiences with On-Line Spectral Analysis Using a Small Digital Computer, A.R.C., C.P. No. 1225, 1972.
- 6) Patterson, J. L.; A Miniature Electrical Pressure Gage Utilizing a Stretched Flat Diaphragm, NACA TN-2659, April 1952.
- 7) 兼重寛九郎: 機械設備便覧, 丸善K.K.

付 録 1

複素数の高速フーリエ変換は文献(5)に発表されているが、さらに高速化と便利なように改良したサブルーチンを発表する。図A-1。

主プログラムからこのサブルーチンをコールすることにより複素数の高速フーリエ変換を容易に行うことができるので参考にして載きたい。

SUBROUTINE FAST43(M,X)のMは 2^M 個のデータ数を表わす指数, Xはデータの値である。

```

SN      ST-NO      SOURCE PROGRAM
1          SUBROUTINE FAST43 (M,X)
2          DIMENSION X(1),W(2049),INDJ(12)
3          COMPLEX X,W,T
4          DATA ML/O/
5          IF (ML.EQ.M) GO TO 3
6          NTWID4=2**(M-2)
7          NTWID2=NTWID4+NTWID4
8          N=NTWID2+NTWID2
9          PHASE=3.1415926536/FLD4T(NTWID2)
10         DO 1 I=1,NTWID2+1
11         TH=-FLD4T(I-1)*PHASE
12         W(I)=CEXP(CMPLX(0.0,TH))
13         1 CONTINUE
14         ML=M
15         3 CONTINUE
16         DO 7 I=1,M
17         INDJ(I)=0
18         7 CONTINUE
19         DO 2 J=2,N-1
20         I=1
21         8 CONTINUE
22         IF (INDJ(I).LE.0) GO TO 9
23         INDJ(I)=0
24         I=I+1
25         GO TO 8
26         9 CONTINUE
27         INDJ(I)=1
28         JJ=1
29         DO 10 I=1,M
30         JJ=JJ+INDJ(I)*2**(M-I)
31         10 CONTINUE
32         IF (JJ.LE.J) GO TO 2
33         T=X(J)
34         X(J)=X(JJ)
35         X(JJ)=T
36         2 CONTINUE
37         DO 5 K=1,M
38         IDISP=2**(K-1)
39         IRAT=NTWID2/IDISP
40         DO 5 J=1,DISP
41         IND=IRAT*(J-1)+1
42         IS=IND
43         IE=IND+IRAT-1
44         DO 5 I=IS,IE
45         IJ=2**K*(I-1)-(N-1)*(J-1)+1
46         IJD=IJ+IDISP
47         T=X(IJ)+X(IJD)*W(IND)
48         X(IJD)=X(IJ)-X(IJD)**(IND)
49         X(IJ)=T
50         5 CONTINUE
51         RETURN
52         END
    
```

図A-1 複素数の高速フーリエ変換のサブルーチン

付 録 2

貯気槽から一様断面 A_1 のノズルを通して流体が流れている。ノズルの断面形は図 3 に示すように長さに対して十分小さいので流れはポアズイユ流となっていると考えられる。その場合、 P_R と P_{out} の圧力損失 h_l は Darcy の式で表わされる。

$$h_l = \lambda_1 \frac{l}{4m_1} \frac{V^2}{2g} \quad (\text{A2-1})$$

ここで、ノズルの断面形が長方形の場合

$$m_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{bh}{b+h} \quad (\text{A2-2})$$

$$\lambda_1 = \frac{8b^2}{(b+h)^2 X} \cdot \frac{64}{Re} \quad (\text{A2-3})$$

$$Re = \frac{2\nu}{\nu} \cdot \frac{bh}{b+h} \quad (\text{A2-4})$$

である。 $\frac{b}{h} = 4$ のときは文献(7)の表より $X = 4.498$ である。

次に断面積の変化による損失 h_s は次の式で表わせる。

$$h_s = \zeta_1 \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (\text{A2-5})$$

ここで、急に広くなる場合は損失係数 ζ_1 は次式で示される。

$$\zeta_1 = \left\{ 1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right) \right\}^2 \quad (\text{A2-6})$$

今、ノズル、カムの形状および間隙の詳細図を図 3 に示した。単位は mm である。圧力損失 h_l 、断面積変化による損失の単位は mmAq (水柱) である。カムの形状は円周に 24 波長でその振幅は ± 0.5 mm で形成されている。しかも、カムとノズルの間隙は 0 ~ 5 mm の範囲で調整できるような構造である。実際には P 点における圧力変動が正弦的に変動するようにこの間隙を調整する。

変動間隙は $A_2 = A_3 + A_4 \sin \omega t$ で、 $A_3 \gg A_4$ の条件で変化するとすると $\left(\frac{A_4}{A_3} \right)^2$ の項が無視できるので、

$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{\frac{A_1}{A_3}}{1 + \frac{A_4}{A_3} \sin \omega t} \right)^2$$

$$\begin{aligned} &= \left(1 - \frac{A_1}{A_3} \left(1 - \frac{A_4}{A_3} \sin \omega t \right) \right)^2 \\ &= 1 - 2 \frac{A_1}{A_3} + \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^2 \\ &\quad + 2 \left(\frac{A_1 A_4}{A_3^2} - \frac{A_1^2 A_4}{A_3^3} \right) \sin \omega t \end{aligned} \quad (\text{A2-7})$$

$P_R - P_{out} = h_l$ であるから $P_{out} = P_R - h_l$ 、 $P_{out} - P_a = h_s$ であるので $P_{out} = h_s + P_a$ である。また、 P_R から P_{out} の圧力損失は距離に対して線型であると仮定すると、 P 点の圧力 P は $P = h_l \frac{l_1}{l} + P_{out} = h_l \frac{l_1}{l} + h_s + P_a$ である。 P_a は大気圧であり、大気との差圧を考えると

$$\begin{aligned} P &= h_l \frac{l_1}{l} + \left\{ 1 - 2 \frac{A_1}{A_3} + \left(\frac{A_1}{A_3} \right)^2 \right\} \cdot \left(\frac{V^2}{2g} \right) \\ &\quad + 2 \left(\frac{A_1 A_4}{A_3^2} - \frac{A_1^2 A_4}{A_3^3} \right) \cdot \left(\frac{V^2}{2g} \right) \sin \omega t \end{aligned} \quad (\text{A2-8})$$

P_R は大気を基準にしたゲージ圧である。

$P_R = 0.1 \text{ kg/cm}^2$ とし、平均風速 3 m/s とすると

$$Re = 657.5$$

$$\lambda_1 = 0.1107$$

$$m_1 = 0.8$$

$$h_l = 1112.0 \quad (\text{mmAq})$$

$$h_s = 51.0 \quad (\text{mmAq})$$

$$P = 607.4 + 34.0 \times \sin \omega t \quad (\text{mmAq})$$

$$(\text{A2-9})$$

ここに P は大気との差圧である。(A2-8) 式はノズルの粘性流による圧力損失とカムの部分の面積比による圧力損失から概算を求めたもので厳密に解くには複雑な非定常の Navier-Stokes の式を解かなければならない。ちなみに、カムを手動で回転させ定常圧力を水柱で測定した結果は間隙を 1 mm のとき、

$$P_{exp} = 444. + 25. \times \sin \omega t \quad (\text{mmAq})$$

$$(\text{A2-10})$$

であった。概算値として (A2-8) 式は用いられる。ここで l はノズルの長さ、 l_1 はノズルの出口から P 点までの距離、 b はノズルの幅、 h はノズルの高さ、入口の摩擦係数、 ζ_1 は断面積の変化による損失係数である。

付 録 3

使用した圧力変換器の性能表を下記に示す。

	会社名	型式名	容 量	感 度	入出力抵抗	供給電圧
1	共和電業社	PS-2KB	2kg/cm ²	0.8mV/V	120 Ω	3 V
2	Entran Devices社	EPI-080-25	25 psi	2.69mV/psi	800 Ω	5 V
3	Druck社	PDCR22	15 psi	20mV	—	12 V

(注) 感度の単位がまちまちであるが変換器に規定の供給電圧をかけたときの値で、①では圧力を2kg/cm²かけたとき供給電圧1V当り0.8mVの出力電圧を生ずる。③では15psiかけたときの出力電圧を示す。

航空宇宙技術研究所資料475号

昭和57年10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 株式会社三興印刷
東京都新宿区信濃町12 三河ビル
