

非定常流測定用プローブ特性の直交多項式検定

(昭和49年5月17日 原稿受理)

機械工学教室 松 永 成 徳
 機械工学科(大学院) 坂 梨 俊 昭
 機械工学教室 宇 野 美 津 夫

Combined Probe Characteristics Calibrated in Terms of Polynomial for Measurement of Unsteady Flow

by Shigenori MATSUNAGA
 Toshiaki SAKANASHI
 Mitsuo UNO

The calibration procedure to measure the unsteady flow by means of a combined probe is established.

The characteristics of the sphere probe calibrated in a pipe flow are analyzed regressively into orthogonal polynomials, which promote efficiency in data processing.

The standard deviation between the polynomial characteristics and the experimental data was calculated to estimate the accuracy. The standard deviation was 0.01 in the case of flow direction measurement, 0.03 for the static pressure and 0.04 for the velocity head in the present experiments.

The degree of the polynomial is discussed in relation to various ranges of the flow direction.

It is also shown that the viscous effect on the indicated pressure decreases due to the fluctuation of flow in the pipe comparing with Fage's data.

1 ま え が き

非定常流を測定するために複合形のプローブを非平衡法で使用し, その特性数を指圧相関数¹⁾の高次多項式として回帰分析しておけば, 実測したデータの処理能率を向上できるとともに特性多項式の精度評価も可能になる²⁾。この多項式の次数は測定する流れの方向変化の範囲が広くなるとともに増大し, 回帰分析に要する計算時間も増加する。

本報告はすでに実行された三孔プローブ特性の多項式検定計算プログラム²⁾を改良して計算時間の短縮を試み, 方向測定範囲と多項式次数の関係, 実用特性式の適合性の評価について述べるものである。

なお検定管内の流れの変動状態を調和解析により調べ, プローブ指示圧力と, 定常流における球の表面圧力とを比較してレイノルズ数の影響が流れの変動により減少していることを示した。

2 記 号

a	流動変換部半径
B	脈動振幅
Cp	圧力係数
d_1	取圧孔径
d_1	導圧管径
DCp_{23}	$Cp_2 - Cp_3$
Dp_{23}	$p_2 - p_3$
Dp_{45}	$p_4 - p_5$
Dp_A, Dp_D	差圧
D_v	渦の直径
E	直流電圧
e	出力電圧
$EPS, EPSPM$	多項式の収束精度
$\ e\ $	残差平方和
f	周波数
G	ゲイン
K	多項式の次数

l_i	導圧管の長さ
M	回帰分析に用いるデータ数
p_i	取圧系指圧
P_i	全圧
P_s	静圧
P_v	多項式
R	抗抵
r	分解能
r_1, r_2	抗抵
R_r	レイノルズ数
S_v	多項式の係数
S_r	ストロハル数
V_s	流速
X, Y	指圧相関数
x, y, z	座標軸
α	流れの方向角
α_v, β_v	多項式のパラメータ
γ	比重量
δ	流れの方向角
ν	動粘性係数
σ	不偏分散推定量
θ_h	取圧孔位置を示す角度

添字	
i	取圧系番号または導圧管の段
AV	平均値
exp	実験値
o	共振状態または基準状態
ν	多項式の次数

3 供試プローブ

供試プローブはすでに公表した取圧部径 2 mm, 球形プローブ²⁾の取圧孔径を 0.2 mm に縮小したものである。従来取圧部先端部はコブラ, 球あるいはコニカル形と称していたが, 同部は流れを当物体表面の圧力に変換する機能を有する意味で, 「流動変換部」と称する。

3-1 供試プローブの構成

図1は供試プローブ VS55346 および文献(2)に示した VS55343 の流動変換部を示す。取圧部は流動変換部, 導圧管, 導圧管集合筒および接合ナットよりなる。流動変換部は半径 1.0 mm の半球形で, 取圧孔は 0.2×0.4 mm のニッケル管5本が平行に球表面に開口し, その開口中心角 θ_h は 37° である。同変換部直後の導圧管群は 1.6×1.8mm ニッケル管内にあり, 半球との接合部は 0.2 mm の直径差がある。取圧部は厚み 1 mm の鉛パッキンを介

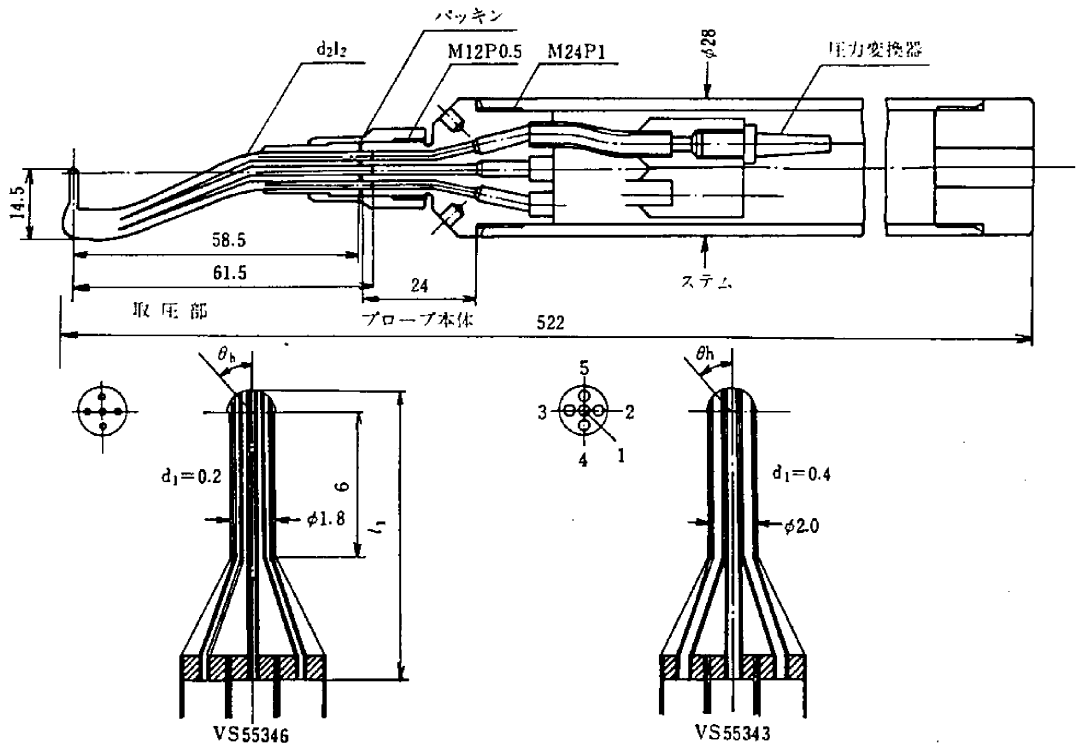


図1 非定常流測定用複合形プローブ (VS 55343, 46)

して接合ナットによりプローブ本体に締付けられる。

プローブ本体は接合部に5箇の導圧管受口を有し、3箇のみを本体後方まで連通して圧力変換器を取付けるようにした二次元測定用である。VS5の5は取圧系5系統で三次元流に使用でき、Vは定常および非定常両用、Sは球形であることを示し、VS553の53は開口部5、圧力変換系の数3を示す。つぎの4は設計系列、つぎの6は製造番号を示す。

つぎにシステムは本体にネジにより接続し圧力変換器を収納するとともにプローブ位置および方向を決定する基準円筒面となる。

流動変換部で変換された圧力は i 段 (直径 d_i , 長さ l_i) の共軸異径拡大管よりなる導圧管をへて受圧膜径5mmの圧力変換器に伝達され温度特性を補償したハーフブリッジ半導体により電圧に変換される。プローブ導圧系の主要寸法を表1に示す。

3-2 プローブ圧力変換機構

流動変換部で変換された圧力の伝達系は取圧孔から圧力変換器受圧膜にいたる導圧管内液柱および弾性膜よりなる振動あるいは波動系と考えられる。圧力変動周期が導圧管系の音速に比べて十分大きい場合は低周波数領域で振動系、周期が小なる場合は波動系である。供試プローブにおいては100Hz程度までを対象とし、振動系として取扱う。

圧力変換器は4Pビニールシールコードによりブリッジ調整器(B.H.)に接続され、直流電源電圧 E を供給され、出力電圧 e は可変抵抗器 R および固定抵抗器 r_1, r_2 によりフルブリッジを構成し平衡をとる。図2はブリッジヘッドの配線図を示す。B.H.は補助の抵抗ブリッジを有し、主ブリッジの出力に直流電圧 e_s を加算できる。両ブリッジとも電源にはニッケルカドミウム電池を使用、その電圧はヘリポット(Herical Potentiometer) R_B, R_S により可変である。

B.H.出力電圧は直流増幅器(DP101 Kuwano, 6L5, Sanei) によつて100~1000倍に増幅される。

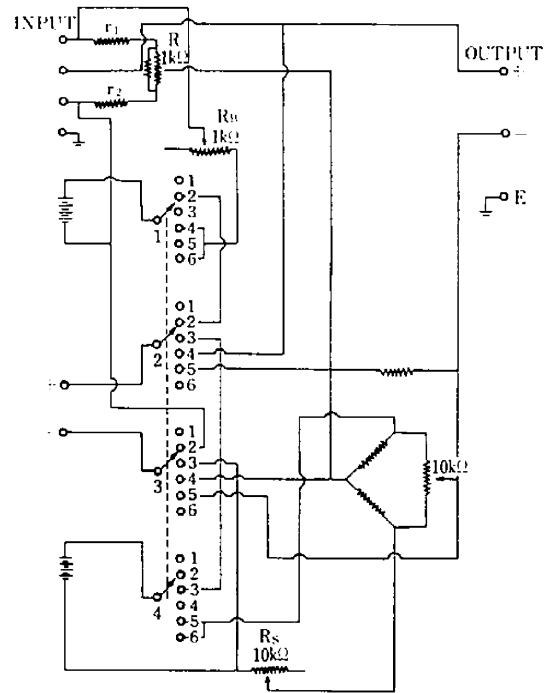


図2 BRIDGE HEAD 配線図

3-3 プローブ圧力変換特性

圧力変換特性は静特性および動特性に分けて考える。

図3は前項に述べたプローブ(Pr)、ブリッジヘッド(B.H.)および直流増幅器(D.C.A.)のドリフト試験結果の一例を示す。3系統について圧力換算ドリフトはスイッチ投入より50分以降 $V_p^2/2g = 1\text{mAq}$ を基準として1%以内である。

図4は感度保持特性試験の結果である。 $(Pr) + (B.H.) + (DP101)$ に3ペンレコーダ(3P.R.)を接続し、3分毎に静加圧装置によって2,1mAqの圧力を交変に与え、20分間にわたり記録した結果を示す。基準圧力1mAqに対する感度変化は1%以内である。

つぎに動特性試験について述べる。図5は試験装置の系統、図6はその写真を示す。

表-1 プローブ導圧系の寸法 (VS 55346)

単位 mm	$d_1 = 0.2$ l_1	$d_2 = 1.8$ l_2	$d_3 = 2.0$ l_3	$d_4 = 3.0$ l_4	$d_5 = 4.0$ l_5	$d_6 = 3.0$ l_6	$d_7 = 6.0$ l_7
導圧系, i							
1	13.2	62.3	23.0	12.0	30.0	4.0	2.0
2	14.3	62.3	23.5	12.5	30.0	4.0	2.0
3	14.3	62.3	23.5	12.5	30.0	4.0	2.0
4	16.9	62.3					
5	11.2	62.3					

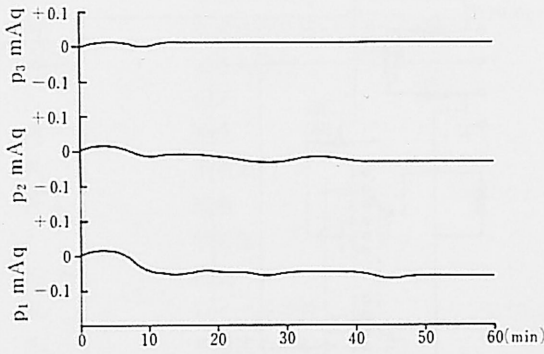


図3 圧力測定系スイッチ投入後の零点移動
(変換係数 1 mAq/1V)

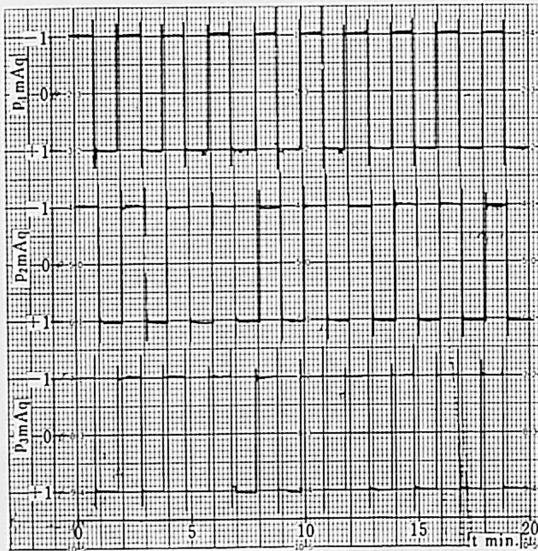


図4 圧力測定系の感度特性 (変換係数 1 mAq/1V)

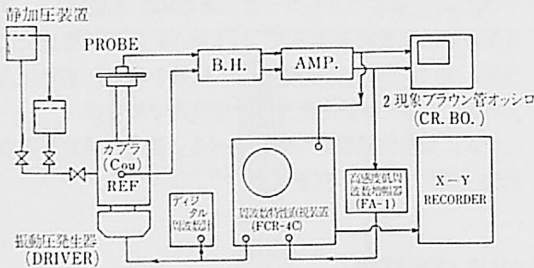
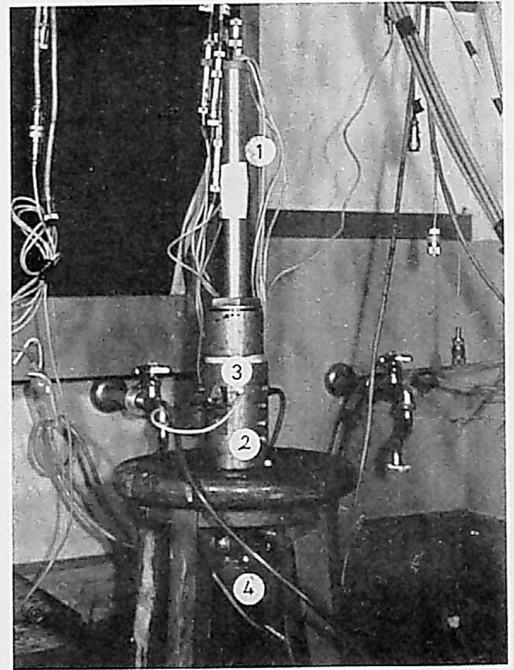
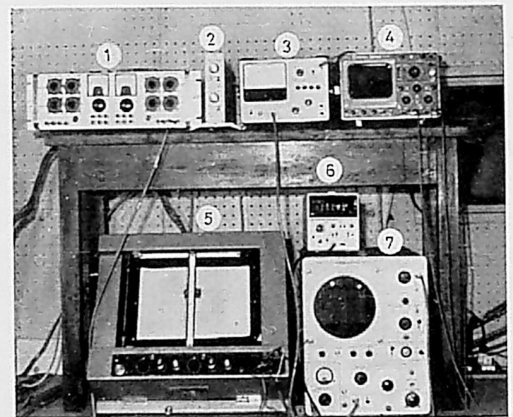


図5 動特性試験装置系統図

プローブは静加圧装置および振動圧発生器 (Driver, Dr) に連結され標準圧力変換器をもち水を充滿したカップラ (Cou) に装着, 前記増幅系と周波数特性直視装置 (FCR-4C) 高感度低周波増幅器 (FA-1) および X-Y レコーダ (X-Y.R), デジタル周波数計 (Digital C.),



① Probe ② Coupler
③ Reference ④ Driver
(a) 変動圧力発生装置とプローブ設置状態



① B. H ② D. C. Amp
③ A. C. Amp ④ CR. BO.
⑤ X-Y Recorder ⑥ Digital Counter
⑦ Frequency Response Tracer
(b) 電圧調整, 表示, 記録装置

図6 圧力伝達特性試験装置

2 現象ブラウン管オシログラフ (CR. BO.) により計測あるいは記録する。

周波数特性試験装置は 20 Hz~20 KHz の正弦波をくり返し発生し Dr を駆動して変動水圧を発生する。基準

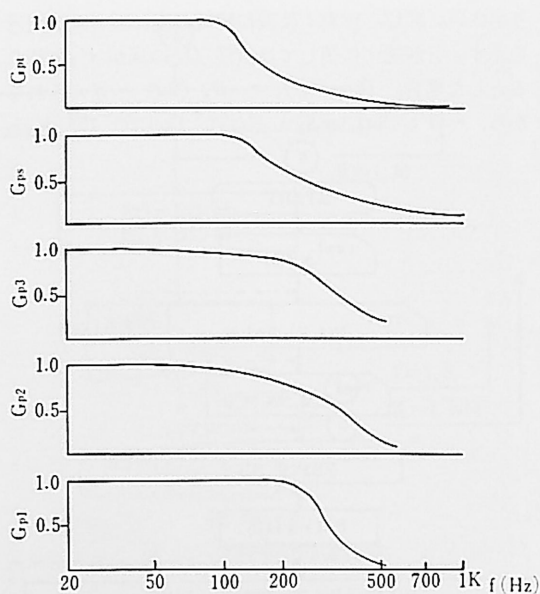


図7 導圧系の周波数特性

表一 導圧系の周波数特性主要値

特性 測定系	f_0 Hz	G_0	ν damp C·Stokes
p_1	294	0.80	41.3
p_2	308	0.75	41.3
p_3	360	0.70	41.3
p_4	120	0.75	28.2
p_5	110	0.80	41.3

圧力変換器 (Ref) はその圧力を検出して低周波発信器の出力を制御し、全周波数域にわたり、圧力振幅をほぼ一定に自動調整する。したがって P_r の出力を $X-YR$ の Y 軸に、周波数の対数に比例した電圧出力を X 軸に描かせその特性を記録できる。図7は周波数特性試験の結果を示す。 Y 軸目盛は静加圧装置により検定されている。

図に示すように $G_0=0.7\sim 0.9$ に調整され、ゲイン増大を示さない。図中 $p_1\sim p_3$ はプローブ導圧系 No. 1~3 の動特性で p_4, p_5 は後述の全圧管および壁面静圧制御管の動特性である。その主要値を表2に示す。以上によって圧力伝達と圧力変換系の周波数特性は $0\sim 100$ Hz で十分平坦で検定実験に使用しうることが分る。

周波数特性の調整はつぎの方法によった。導圧管の d_i, l_i を設計上周波数特性を考慮して決定し、粘度の異なる油を混合して数種の粘度の制動油を作り、真空槽 (2 mm Hg) により導圧管系に充填する。混合油はその容積比によって図8のような粘度をもっている。適正な応答がえられるまで周波数特性試験をくりかえし最終的

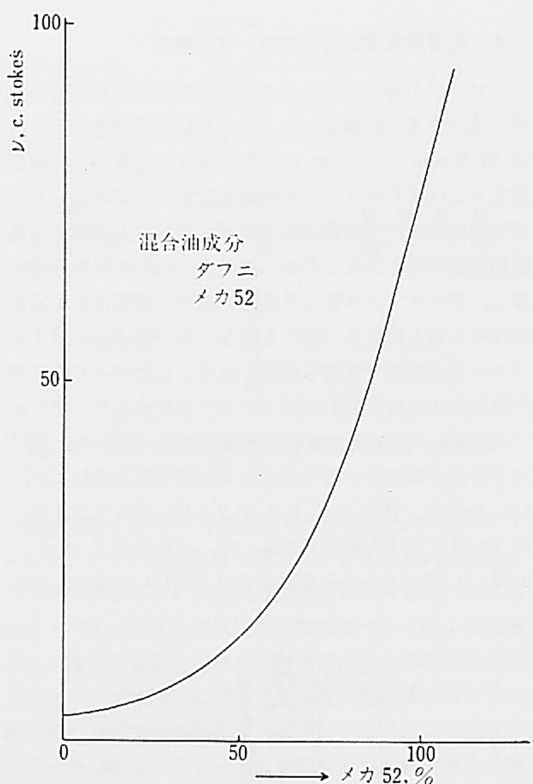


図8 制動油の粘性

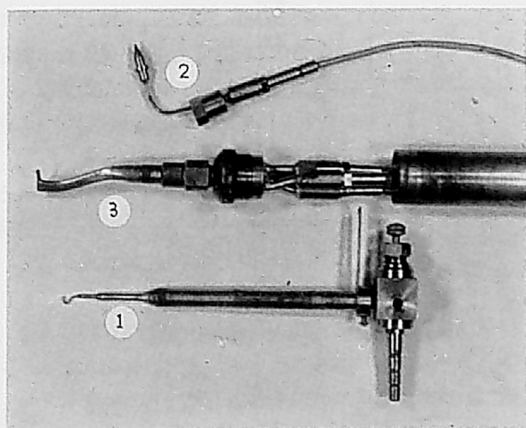


図9 圧力測定系の写真

- ① 全圧管
- ② 壁面静圧制御管
- ③ Probe

に図7の結果をえた。

図9はプローブ等の写真で①②③はそれぞれ全圧管、壁面静圧制御管および供試プローブを全す。②③には圧力変換器を装着した状態を示してある。

4 直管内水流によるプローブの検定

プローブの特性検定はなるべく実測時の流れに近い条件で実行するのが望ましい。ここでは通常の送水系に内径 91.6 mm, 長さ 4 m の直管を設けて基準全圧, 壁面静圧およびプローブ圧力を同時測定する方式によった。検定部の前後には図10に示すような, 抵抗と容量による脈動制動装置を設置したが, 渦や多少の圧力脈動分は残存し, 管レイノルズ数は乱流域にあり, 表面圧力が定常流れのものと異なる可能性もあり, また渦寸法に対するプローブの応答分解能も問題となる。したがって検定管内の流動状況を予備的に調べておく必要があり, プローブを固定して記録した圧力変動を周波数分析した。図11は分析周波数に対するその成分で取圧係数 CP_1 , CP_2 を示す。図に示すように 2.5 Hz の成分が 9%, 30 Hz 以上では 2% 以下であった。定常値はそれぞれ 0.98, 0.50 であるから脈動成分は 2.5 Hz を除き, かな

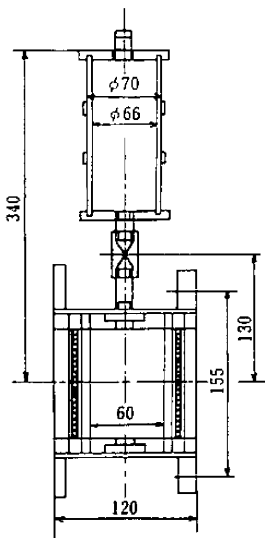


図10 脈動制動装置組立図

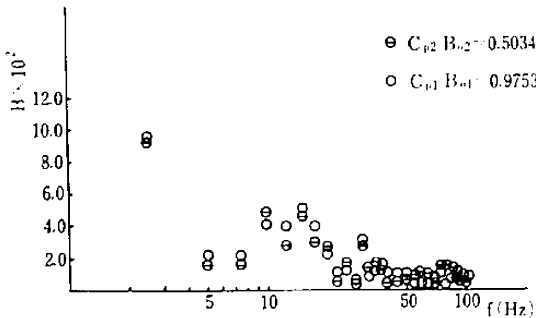


図11 検定管主流圧力変動の周波数分析

り小さい。図12, 付表1は調和解析の流れ図および記号を示す。分解能 r に関しては直径 D_V の渦が V_S で流れるとした場合, $D_V = V_S / f$, $r = D_V / \lambda$ (2a) と考えられるから, $r = V_S / (2af) \propto S_T^{-1}$ となり, $f = 1.5, 15, V_S =$

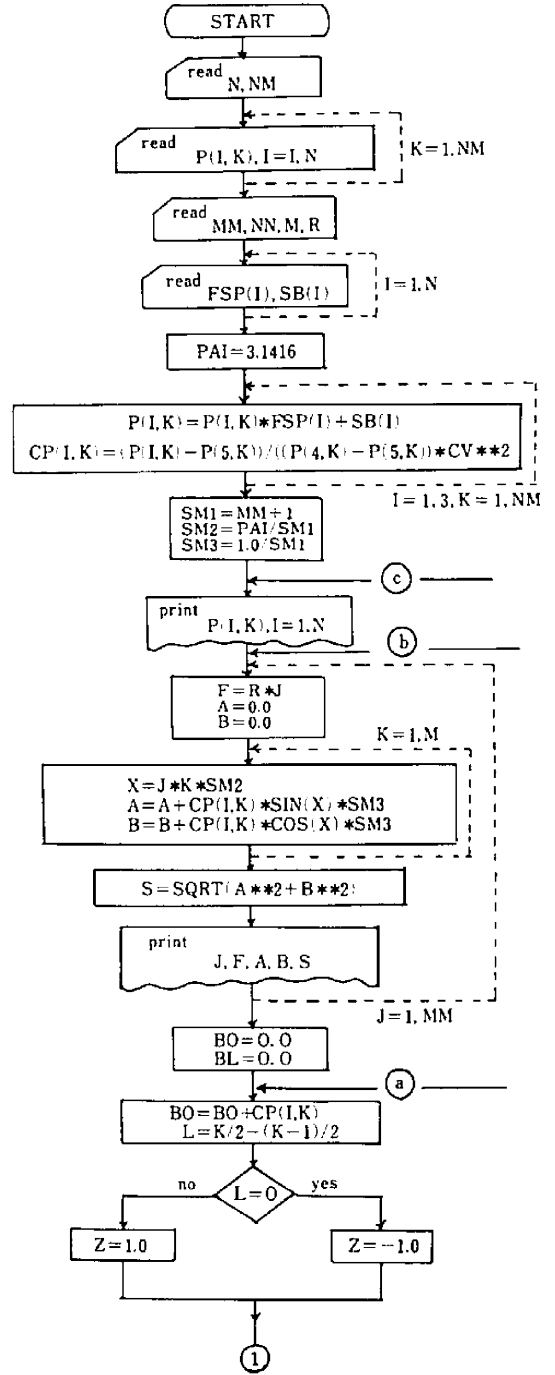


図12-1

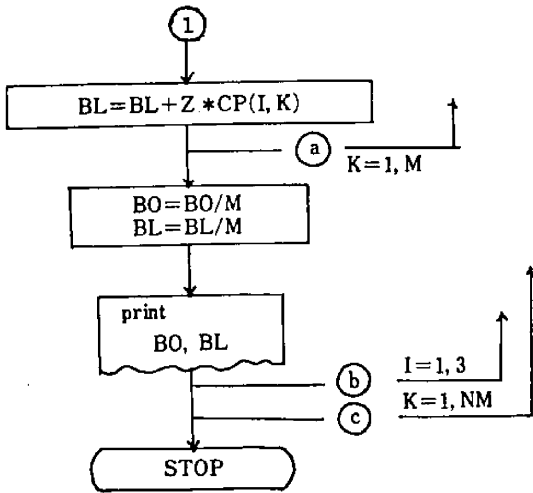


図 12-2

図 12 調和解析の流れ図

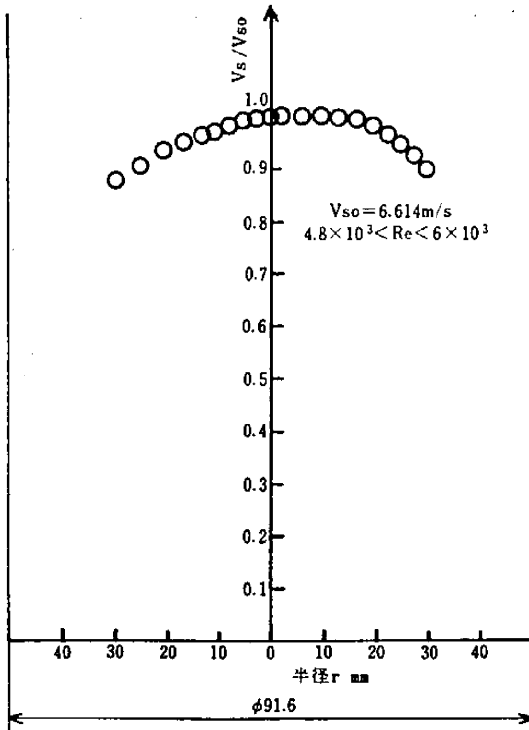


図 13 検定管内の速度分布

5.5, $a=10^{-3}$ のとき $r=1.83 \times 10^3$, 1.83×10^3 なる分解能となり検定管内の脈動に対しては十分な分解能をもつ。なお図 13 は検定管直径上の速度分布, 図 14 はプローブをその軸のまわりに回転した際の基準全圧指示の変化であり, 0.5%以下となっている。

4-1 検定装置

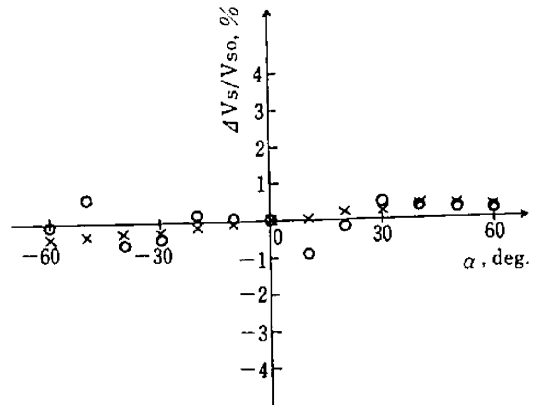


図 14 プローブ設置状態の管路基準流れへの影響

検定装置は図 15 に示す様に地下水槽の水を 45 KW タービンポンプで検定管路へ送水し, せきあるいは水路をへて地下水槽へかえす回流方式である。検定管内の流速はバイパスバルブと空気圧式流量調整バルブにより調整され, 静加圧装置を切替えて圧力変換器の感度設定を行う。プローブは図 16 に示す自動往復回転装置によりその軸のまわりに方向を変化し, プローブのシステムに取り付けられた $\phi 0.5$, 2° ピッチの細孔をもつ回転円板と光電式パルスピックアップにより発生する角度パルスデータをデータ集録の同期パルスとして各取圧系の圧力を記録する。プローブに対する基準流速は 30 mm 上流に設置した全圧管と壁面静圧タップとの差圧より決定する。図 17 (a) は空調室内におかれた計測装置の写真でその系統は図 15 中に示すように, つぎの 3 系統よりなる。

(1) 圧力変換器の平衡, 感度, 打消し電圧調整を行うためのブリッジ調整器および直流増幅器よりなる信号系統

(2) 流れの方向角発信用ヘリポート出力系

(3) 光電パルスによる方向角同期系

さらに信号の感度, 零点保持の確認および調整, 監視用として 6 現象ブラウン管オシロ, ペンレコーダ, デジタルボルトメータ等がある。記録部は高速磁気記録装置でデジタル変換型が使用され, 記録されたデータは紙テープにデジタル量としてパンチアウトする。なお図 17 (b) はプローブ自動回転装置の写真を示す。

4-2 実験方法

実験方法はつぎのように要約される。

(1) プローブを検定管の所定位置に設置し, 流れの方向に正対させ, 回転角の範囲を設定する。

(2) 予定流速で流水し, プローブを回転速度 6 rpm で回転させて光電パルス数, 角度基準点, 方向変化の範

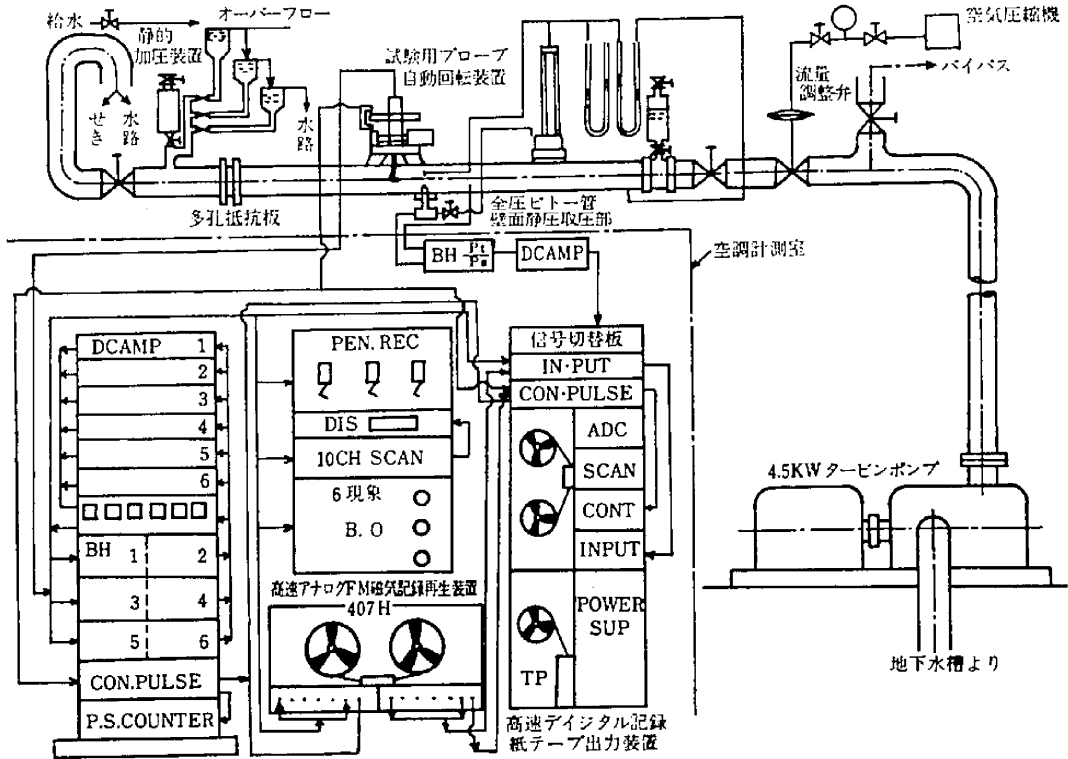


図 15 プローブ検定および計測装置

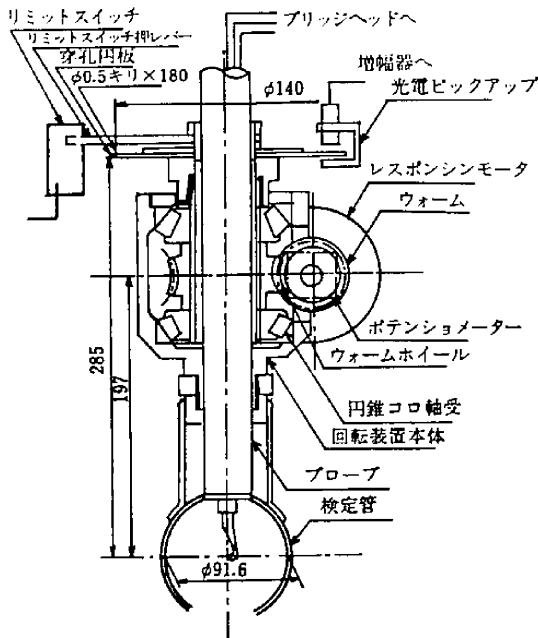


図 16 プローブ自動回転装置

間、およびその基準点に対する対称性、取圧系の応答などをデジタルカウンタ、ヘリポット角度発信器、ペンレコーダ、ブラウン管オシロスコープで確認する。

(3) 検定管両側の仕切弁を閉じ、静加圧装置により全系統の計測感度、零点を調整する。

(4) 再び検定管内に予定流速で流水する。

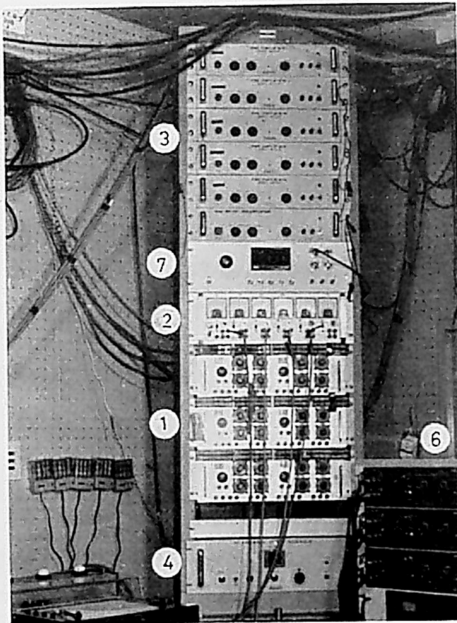
(5) (3)、(4) をくり返ししながら検定管内流れの安定状態を確認する。

(6) 再び(3)を行い、管内圧力をマンメータにより正確によみとり同時に高速デジタル記録装置にプローブ、全圧管、壁面静圧の指圧を記録し両者の比をとって電圧・圧力水頭の変換尺度とする。

(7) 再び管端バルブを開き、検定管に流水し、プローブを自動回転させながら数往復分の取圧孔圧、全圧管および壁面静圧の指圧の出力電圧 $e_{pi}(i=1, 2, 3, 4, 5)$ を高速デジタル記録装置で記録する。この時前述した光電パルスにより同期させ、同時にデジタルカウンタでパルス数の確認を行う。

5 電子計算機によるプローブ特性の多項式近似

高速デジタル処理装置に記録されたデータは紙テー



- ① B. H.
 - ② Ind. Meter
 - ③ D. C. Amp
 - ④ 10 ch. Scanner
 - ⑤ Pen Recorder
 - ⑥ 6 Beam C. R. O
 - ⑦ Digital Volt Meter
- (a) 6系統電圧調整, 増幅, 表示装置

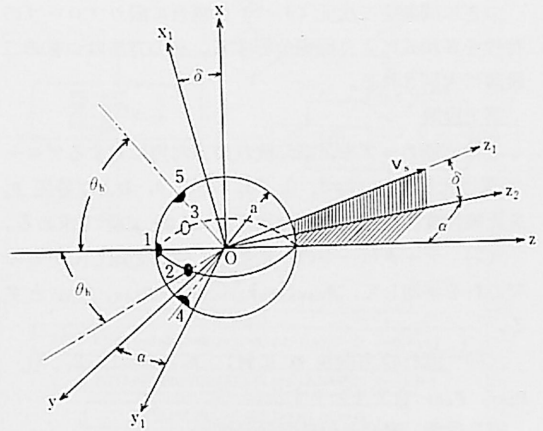


図 18 流動変換部と速度ベクトル

プにパンチアウトし九大九工大リモートパッチシステムにより処理され、プローブの基礎特性および実用特性の多項式近似を行ないその適切さを評価する。

一般に非圧縮非定常三次元流れは、速度ベクトルの3成分と静圧とによって決定されるから、本測定法の場合、図18に示す流動変換部表面のことなる4点の圧力を同時測定して処理できるはずである。しかし現実の測定は非平衡法によるので処理上の便宜を考慮して²⁾5点の圧力を測定し、圧力係数式(1)、指圧相関数式(2)、動圧係数式(3)をプローブ特性式と定義する。

$$C_{p1} = (p_1 - p_s) / (p_t - p_s) = (p_1 - p_s) / (\tau v_s^2 / (2g)) \quad (1)$$

$$X = Dp_{23} / Dp_A, Y = Dp_{45} / Dp_D \quad (2)$$

$$DC_{rA} = Dp_A / (\tau v_s^2 / 2g) \quad (3)$$

$$Dp_A = p_1 - p_3; (p_2 \geq p_3), Dp_A = p_1 - p_2; (p_2 < p_3) \quad (4)$$

$$Dp_D = p_1 - p_5; (p_4 \geq p_5), Dp_D = p_1 - p_4; (p_4 < p_5) \quad (5)$$

これらの定義式を後述する多項式で回帰分析し、つぎのように流れの方向式(6)、速さ式(7)、静圧式(8)、および全圧式(9)が計算できる。

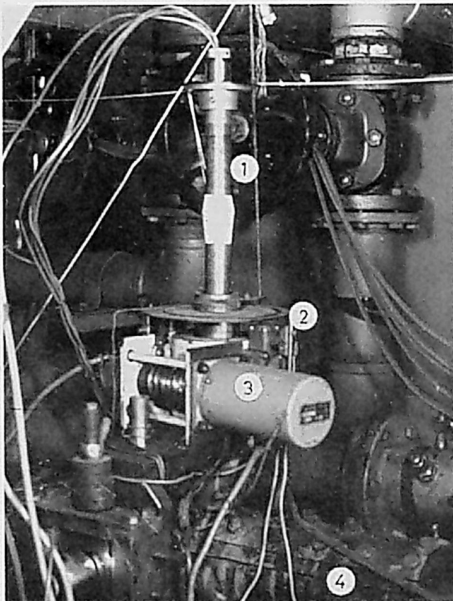
$$\alpha = \alpha(X, Y), \delta = \delta(X, Y) \quad (6)$$

$$v_s = (2g Dp_A / (\tau DC_{rA}))^{1/2} \quad (7)$$

$$p_s / \tau = p_1 / \tau + C_{ps} \cdot Dp_A / \tau, C_{ps} = -C_{p1} / DC_{rA} \quad (8)$$

$$p_t / \tau = p_1 / \tau + C_{pt} \cdot Dp_A / \tau, C_{pt} = (1 - C_{p1}) / DC_{rA} \quad (9)$$

以上により準定常流を仮定しうる範囲で変動流を実験解析しうる。



- ① Probe
 - ② Limit Switch
 - ③ Motor
 - ④ Flow Pipe
- (b) プローブ自動回転装置

図 17 プローブ検定装置

つぎに問題を二次元 ($\delta=0$) の場合に限りプローブの特性を多項式により回帰分析する。その方法はつぎの二段階に大別される。

第1段階

(1) 紙テープをよみ、流れの方向角に対するプローブ取圧孔圧力 $p_i (i=1, 2, 3)$, 全圧 p_t および静圧 p_s を変換尺度係数により圧力水頭 (mAq) の形で求める。

(2) データは一つの α に対して数箇記録してあるのでこれを平均して, $p_{iAV} (i=1, 2, 3)$, p_{tAV} , p_{sAV} とする。

(3) 流れの方向角 α に対し $p_{iAV} (i=1, 2, 3)$, p_{tAV} , p_{sAV} をプリントする。

第2段階 直交多項式回帰分析

ここに利用した多項式は FACOM 230-60 サブルーチン 1/002 である³⁾。サブルーチンの多項式は CP_i , α , Dp_A に共通に使用できるのでまとめて CP_i で表現するとつぎのようになる。ただし、今回は問題を二次元

($\delta=0$) の場合に限った。ここに

$$CP_{iK} = \sum_{j=0}^K S_j^{(K)} P_j(X) \tag{9}$$

$$\left. \begin{aligned} P_0(X) &= 1.0 \\ P_1(X) &= (X - \alpha_1) \cdot P_0(X) \\ P_2(X) &= (X - \alpha_2) \cdot P_1(X) - \beta_1 P_0(X) \\ &\dots\dots\dots \\ P_r(X) &= (X - \alpha_r) P_{r-1}(X) - \beta_{r-1} \cdot P_{r-2}(X) \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

である。

式 (9) の係数 $S_j^{(K)}$, パラメータ α_v , β_v および次数 K を最小自乗的に決定し, EPS を逐次変化し,

$$\left. \begin{aligned} \|e\|^{(K)} &= \sum_{j=1}^M (CP_{iEXPj} - CP_{iK}(X_j))^2 \\ \sigma_K^2 &= \|e\|^{(K)} / (M-1-K) \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

$$\sigma_K^2 < EPS \text{ かつ } |\sigma_K^2 - \sigma_{K-1}^2| < EPS \tag{12}$$

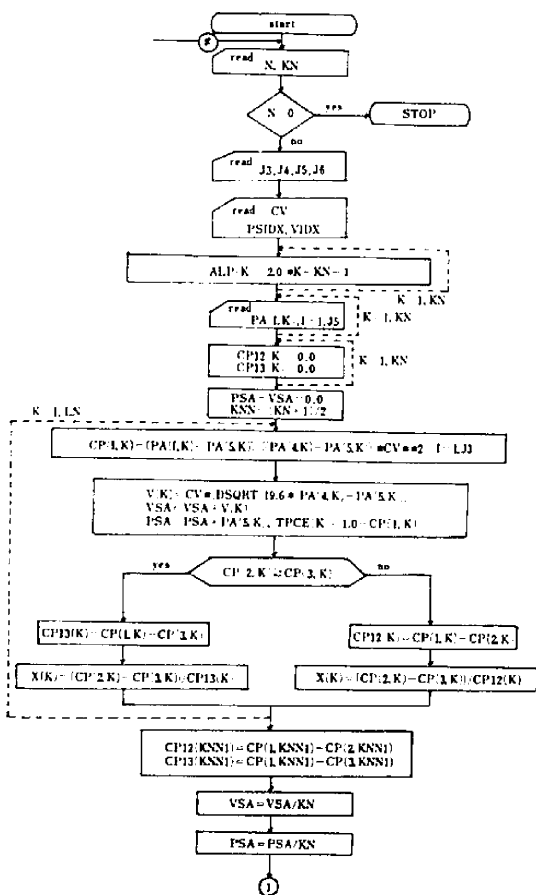


図 19-1

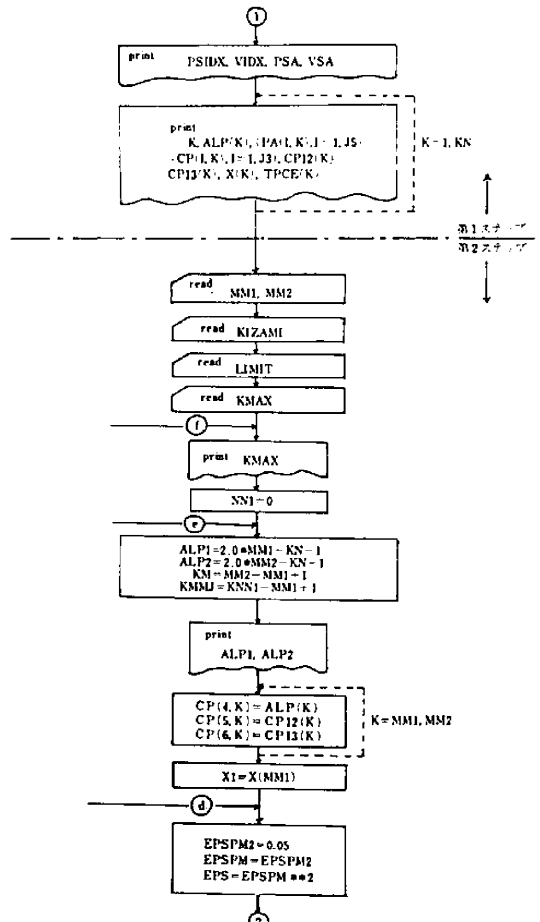


図 19-2

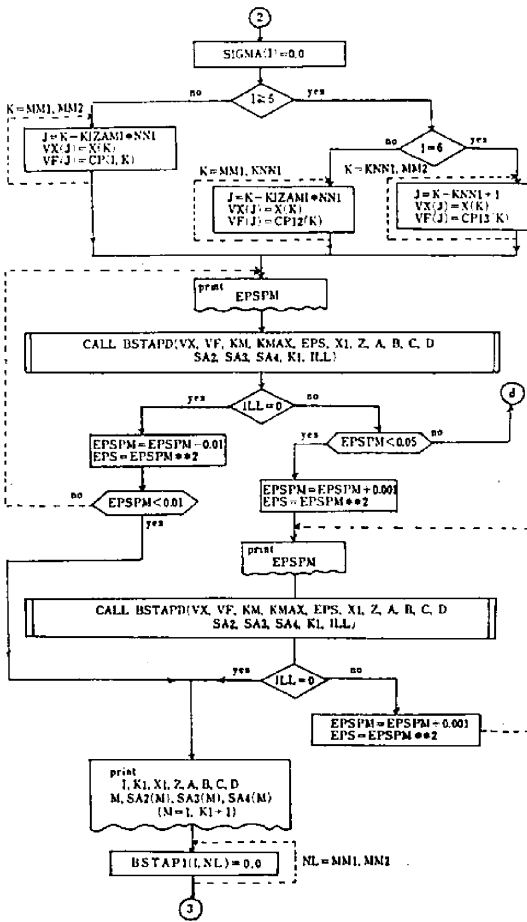


図 19-3

を満たしたとき、その多項式を採用する。ここで EPS は 0.0025 より 0.0001~0.0004 まで逐次低減した。

この計算過程の流れ図、プログラム、および記号をそれぞれ図 (19), 図 (20), 付表 2 に示す。なお所要計算時間は直交多項式の採用によって前報²⁾の場合と比較して約十分の一に短縮できた。

6 検定多項式と実験値の検討

検定多項式特性と実験値との対比を示すと、図 21, 図 22 のようになる。

図 21 は指圧相関数 X に対する CP_1 特性を示す。多項式の最大近似次数を $K_{max}=30$ とした場合、流れの方向変化範囲を数段階に分けて分析した結果は、範囲を狭めると一般に次数を低減でき、 $\pm 60^\circ$ から 30° 狭めた例によると CP_2, CP_3 の場合、次数を数次程低下している。しかし CP_1 のように $\pm 60^\circ$ で 15 次、2% で収束したものが、 $\pm 30^\circ$ で収束不能に陥る場合もある。これは

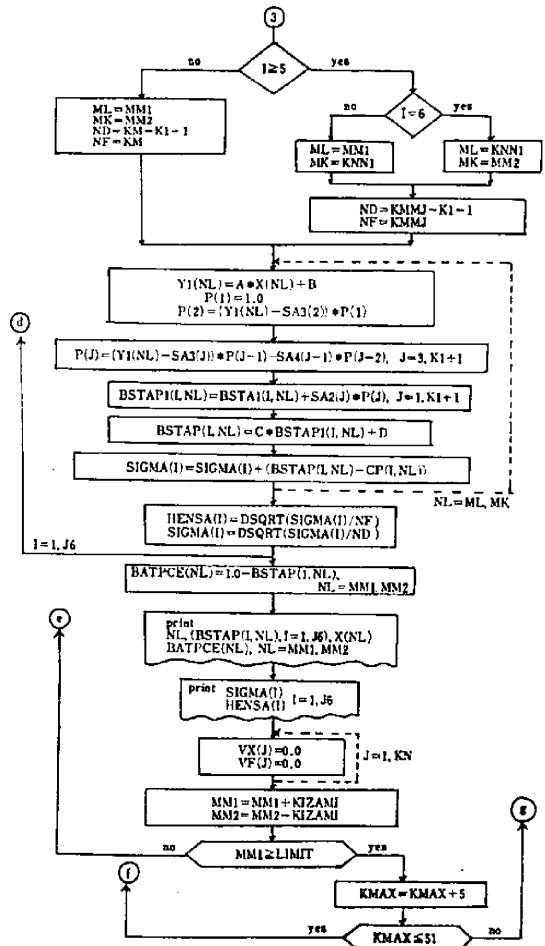


図 19-4

図 19 三孔プローブ特性の直交多項式検定流れ図

α の範囲を小に限定した場合、取圧孔形状の影響と思われるデータの分散がウェイトを持ったためと考えられる。

図 22 は $v_s=5.5 \text{ m/s}$ の場合の実用性曲線である。標準偏差は $\alpha: 0.01$, 圧力係数 $CP_1: 0.03$, 動圧係数 $DC_{pA}: 0.04$ をえており、ほぼ満足すべき精度といえる。

つぎに本実験のデータおよび帰帰曲線に対する乱れの影響について考察するため、Fage の実験結果⁹⁾と比較した。Fage のデータは直径 152 mm の球表面圧力を乱れの少ない吹出し風洞で測定したものであり、本実験のデータは少なからず乱れを含み、また取圧孔径比は $d_1/(2a)=0.1$ とかなり大きい。しかし図 23 に示すようにその圧力係数は Fage の大きい R_s の場合に近く、乱れのために粘性効果が低下したものと解する。

```

0003 C ***SAIRYO TAKOSHIEI KINJI PROGRAM ***
0004 CP1(10)=0UB1E
0005 *TIME ON ALP(100),PA(4,100),CP(4,100),CP12(100),CP13(100),VF(100)
0006 1-3(100)-TPCE(100),SIGMA(100),MNSA(100),VF(100),SA2(100)
0007 15A(100),SA4(100),BSTAP(4,100),Y1(100),W(TD),BSTAP(4,100)
0008 14VF(100),MNSOM(100)
0009 C ****I44EN DATA NO STORED *****
0010 *****ALPHA CP TPCE W NO EISAN OUTPUT *****
0011 4000 READ(5)=14-EN
0012 4 FORMAT(215)
0013 IF (E=0) GO TO 10000
0014 WRITE(6)=33
0015
0016 51 FORMAT(1)=1-201,*****000E KENTEI (UNVE NO SAIRYO TAKOSHIEI KINJI)***
0017 READ(5)=21-23,JA-JJ,JA
0018 2 FORMAT(1)=5
0019 READ(5)=3)PSID=CV,V1X
0020 3 FORMAT(2)=8,3,7,7,2)
0021 DO 1000 I=1,EN
0022 ALP(I)=2,0*E-4*
0023 READ(5)=4) (PA(I),K)=I-1-JJ,X=1-EN)
0024 4 I=1,EN)
0025 DO 1010 I=1,EN
0026 PA(I)=PA(2)=K
0027 PA(I)=PA(1)=K
0028 PA(I)=PA(4)=K
0029 1010 CONTINUE
0030 TD 1010 I=1,EN
0031 CP1(I)=0.0
0032 CP12(I)=0.0
0033 CONTINUE
0034 VSA=0.0
0035 PSAM=0
0036 ENM=(EN-1)/2
0037 DO 1020 I=1,EN
0038 TD 1020 I=1,EN
0039 1020 CP1(I)=MNSA(100)-PA(1,133)+((PA(4,133)-PA(1,133))+CV*W)
0040 VSA=VSA+VF(I)
0041 CP12(I)=MNSA(100)
0042 TPCE(I)=1,0-CP(1,1)
0043 IF (CP(1,1).GE.CP(3,1))GO TO 110
0044 CP12(I)=CP(1,1),CP(2,1)
0045 Y1(I)=CP(2,1)-CP(3,1),CP12(I)
0046 GO TO 1030
0047 110 CP12(I)=CP(1,1)-CP(3,1)
0048 K(I)=CP(2,1)-CP(3,1),CP12(I)
0049 1030 CONTINUE
0050 CP12(I)=MNSA(100)-CP(1,133)+((PA(4,133)-PA(1,133))+CV*W)
0051 CP12(I)=MNSA(100)-CP(1,133)+((PA(4,133)-PA(1,133))+CV*W)
0052 VSA=VSA+VF(I)
0053 PSAM=PSAM+VF(I)
0054 5) FORMAT(1)=1-13,2,8,3,3F10.5,3F10.5,2F10.5,2F10.5,2F10.5,2F10.5
0055 15A,1=*,F10.5)
0056 WRITE(6)=33
0057 5) FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0058 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0059 21M)
0060 DO 1030 K=1,EN
0061 WRITE(6)=5)ALP(I),CP1(I),CP2(I),CP3(I),CP12(I),CP13(I),
0062 1CP12(I),TPCE(I),X(4))
0063 5) FORMAT(1)=1-13,2,8,3,3F10.5,3F10.5,2F10.5,2F10.5,2F10.5,2F10.5
0064 1030 CONTINUE
0065 WRITE(6)=0)
0066 4) FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0067 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0068 21M)
0069 110 ATAI WA//3X,CHANNEL1=2X,CP1=5X,CHANNEL2=7X,CP2=2X,CHANNEL
0070 11=2X,CP3=5X,CHANNEL=2X,ALPHA=5X,ALPHA=5X,CHANNEL5=2X,CP12=5X,
0071 1 CHANNEL=2X,CP12=5X)
0072 *****SAIRYO TAKOSHIEI KINJI*****
0073 READ(5)=3)MNSA(100)
0074 5) FORMAT(1)=5
0075 READ(5)=4)EISAN
0076 7) FORMAT(1)=5
0077 READ(5)=8)EMAX
0078 8) FORMAT(1)=5
0079 C TAKOSHIEI NO JISU MENKA ROOP
0080 3000 WRITE(6)=33)EISAN,LIMIT
0081 5) FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0082 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0083 21M)
0084 ALPHA NO HANE NO MENKA ROOP
0085 3500 ALP1=2,0*W1-E*1
0086 ALP2=2,0*W2-E*1
0087 *****MNSA(100)
0088 ENM=ENM+1
0089 WRITE(6)=13)ALP1,ALP2
0090 151 FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0091 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0092 21M)
0093 CP(4,1)=ALP(1)
0094 CP(4,2)=ALP(2)
0095 CP(4,3)=CP12(1)
0096 CP(4,4)=CP12(2)
0097 1040 CONTINUE
0098 SAIRYO JISU NO EISAN ROOP
0099 DO 6300 I=1,4
0100 EPSM2=0.5
0101 EPSPM=EPSM2
0102 SIGMA(I)=2.0
0103 MNSA(I)=0.0
0104 DP=0.0
0105 IF (I-GE.5) GO TO 2000
0106 ML=MNSA(I)
0107 EMAX=EMAX
0108 DO 1070 K=1,EN
0109 J=K+1(EN-M)
0110
0111 VE(J)=VE(I)
0112 VF(J)=VF(I,K)
0113
0114 1070 CONTINUE
0115 GO TO 3000
0116 IF (I-EN) GO TO 2100
0117 X1=X(MNSA(I))
0118 JHEM=J
0119 EMAX=EMAX+J
0120 DO 1080 I=1,EN
0121 J=I+1(EN-M)
0122 VE(I)=VE(I)
0123 VF(I)=VF(I,K)
0124
0125 1080 CONTINUE
0126 GO TO 3000
0127 X1=X(MNSA(I))
0128 EMAX=EMAX+J
0129 J=I+1(EN-M)
0130 VE(I)=VE(I)
0131 VF(I)=VF(I,K)
0132
0133 1090 CONTINUE
0134 3000 WRITE(6)=5)EPSPM
0135 3) FORMAT(1)=5X,MYOJUNHEISA NO SEIDO WA//3X,EPSPM//F(4)
0136 CALL BSTAP(5)=VF,2)EMAX14,EPSPM,2)E14,AB,BC,CD,SA2,SA3,SA4,1)ILL)
0137 IF (ILL-EN) GO TO 2200
0138 WRITE(6)=7)J,ILL
0139 57 FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0140 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0141 21M)
0142 IF (EPSPM.LT.EPSPM2)GO TO 2500
0143 WRITE(6)=8)J
0144 81 FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0145 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0146 21M)
0147 GO TO 4000
0148 2500 EPSPM=EPSPM+0.001
0149 EPSPM=EPSPM2
0150 4100 WRITE(6)=5)EPSPM
0151 CALL BSTAP(5)=VF,2)EMAX14,EPSPM,2)E14,AB,BC,CD,SA2,SA3,SA4,1)ILL)
0152 EPSPM=EPSPM+0.001
0153 EPSPM=EPSPM2
0154 GO TO 4100
0155 2200 WRITE(6)=5)J,ILL,41
0156 58 FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0157 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0158 21M)
0159 110X,MANTEI JYOKEN NO SEIDO DOEN)
0160 EPSPM=EPSPM+0.01
0161 4) EPSPM=2
0162 IF (EPSPM.LT.D)GO TO 4200
0163 GO TO 5000
0164 4200 WRITE(6)=3)X1,2)I,AB,BC,CD
0165 59 FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0166 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0167 21M)
0168 ATAI WA//2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0169 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0170 21M)
0171 40 FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0172 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0173 21M)
0174 WRITE(6)=4)
0175 81 FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0176 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0177 21M)
0178 DO 8010 M=1,EN
0179 WRITE(6)=4)M,SA2(M),SA3(M),SA4(M)
0180 8010 CONTINUE
0181 4000 DO 1100 ML=MNSA(I)
0182 BSTAP(1)=ML,0.0
0183 BSTAP(1)=ML,0.0
0184 1100 CONTINUE
0185 IF (I-EN)GO TO 3100
0186 ML=MNSA(I)
0187 M=MNSA(I)
0188 M=MNSA(I)
0189 M=MNSA(I)
0190 GO TO 3200
0191 IF (I-EN)GO TO 3300
0192 ML=MNSA(I)
0193 M=MNSA(I)
0194 GO TO 3400
0195 3300 ML=MNSA(I)
0196 M=MNSA(I)
0197 3400 M=MNSA(I)+1
0198 M=MNSA(I)
0199 DO 1200 ML=MNSA(I)
0200 VE(ML)=MNSA(I)+B
0201 P(I)=1.0
0202 P(2)=(VE(ML)-SA2(2))/P(I)
0203 DO 1210 J=3,EN
0204 P(J)=(VE(ML)-SA2(J))/P(J-1)+SA2(J)+P(J-1)
0205 DO 1220 J=1,EN
0206 1220 BSTAP(1)=ML,0)BSTAP(1)=ML,0)SA2(J)+P(J)
0207 BSTAP(1)=ML,0)BSTAP(1)=ML,0)
0208 SIGMA(I)=SIGMA(I)+BSTAP(1)=ML,0)
0209 DP=DP+CP(1)=ML,0)
0210 1200 CONTINUE
0211 MNSA(I)=DISPRT(SIGMA(I)/W)
0212 SIGMA(I)=DISPRT(SIGMA(I)/W)
0213 MNSA(I)=DISPRT(SIGMA(I)/W)
0214 6000 CONTINUE
0215 DO 1240 ML=MNSA(I)
0216 1240 BAITCE(ML)=1,0)BSTAP(1)=ML)
0217 WRITE(6)=5)
0218 63 FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0219 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0220 21M)
0221 DO 1250 ML=MNSA(I)
0222 WRITE(6)=6)ML,0)BSTAP(1)=ML,1)1-J)BAITCE(ML)+X(ML)
0223 64 FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0224 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0225 21M)
0226 WRITE(6)=6)
0227 68 FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0228 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0229 21M)
0230 DO 1260 J=1,JA
0231 WRITE(6)=7)SIGMA(I)+MNSA(I)+MNSA(I)
0232 67 FORMAT(1)=10,2X,1HE+X,3HALP,5X,2HP1,8X,2HP2,8X,2HP3,8X,2HP4,8X,
0233 12HP5,7X,3CP1,7X,3CP2,7X,3CP3,7X,4MCP12,7X,4MCP13,7X,4MTPCE,11X,
0234 21M)
0235 18X,MYOJUNHEISA MNSA=*,F10.5,3X,4)E14) MNSA=*,F10.5)
0236
0221 1240 CONTINUE
0222 DO 1270 J=1,EN
0223 VE(J)=0.0
0224 VF(J)=0.0
0225
0226 1270 CONTINUE
0227 M1=MNSA(I)
0228 IF (M1.LT.LIMIT)GO TO 4700
0229 M1=MNSA(I)
0230 GO TO 3500
0231 4700 EMAX=EMAX+3
0232 IF (EMAX-GE.5)GO TO 9000
0233 M1=MNSA(I)
0234 M1=MNSA(I)
0235 GO TO 3500
0236 10000 STOP
0237 END
0238 4)EISAN LMAP . OUTPUT=TPR1

```

図 20 三孔プローブ特性の直交多項式検定プログラム

$d_1/(2\sigma)$ の影響は主として $Cp_i=1.0$ の近傍で顕著で、ステムの影響とともに今後検討すべき問題である。図 24 に多項式の収束次数と回帰分析精度の関係の一例

を示しているが、図よりわかるように精度を高くとれば、収束次数は急激に増加し、分析精度を 3% から 2% に向上させるにも 10 次以上の次数の増加が必要となる。

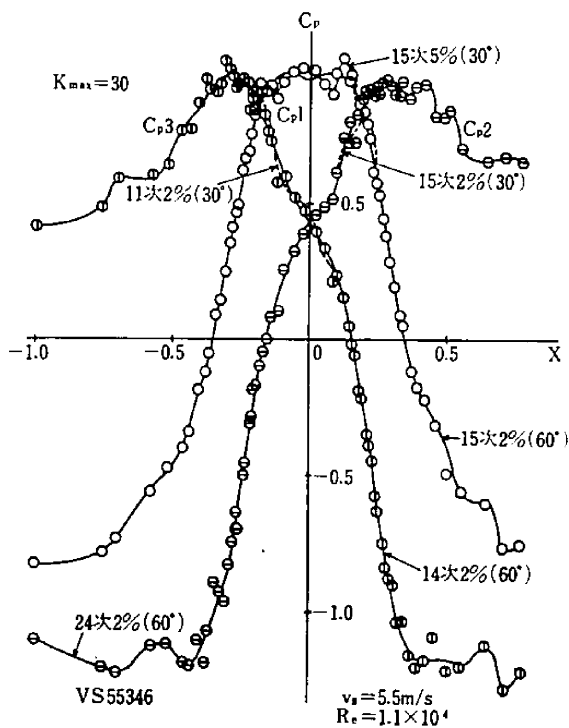


図 21 プロープの圧力係数特性

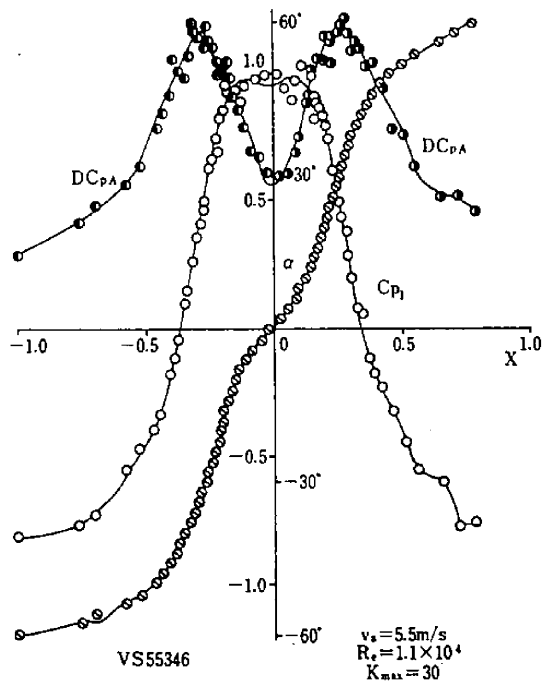


図 22 プロープ実用特性曲線

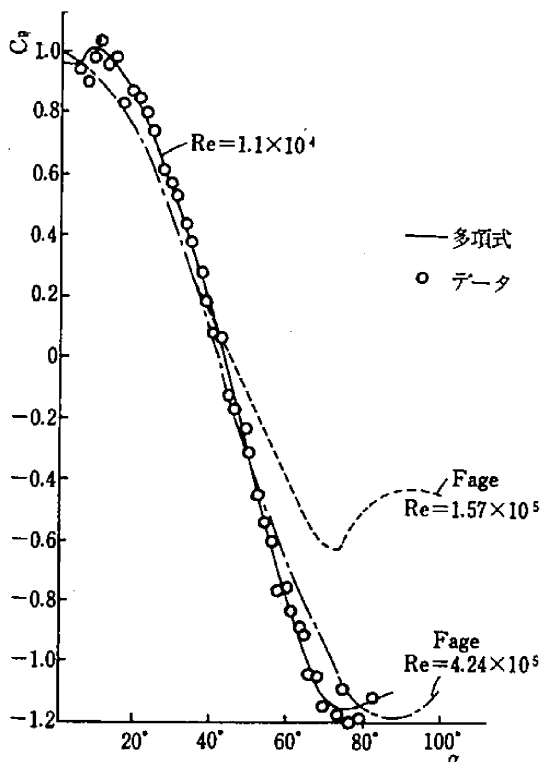


図 23 圧力係数に対するレイノルズ数の影響

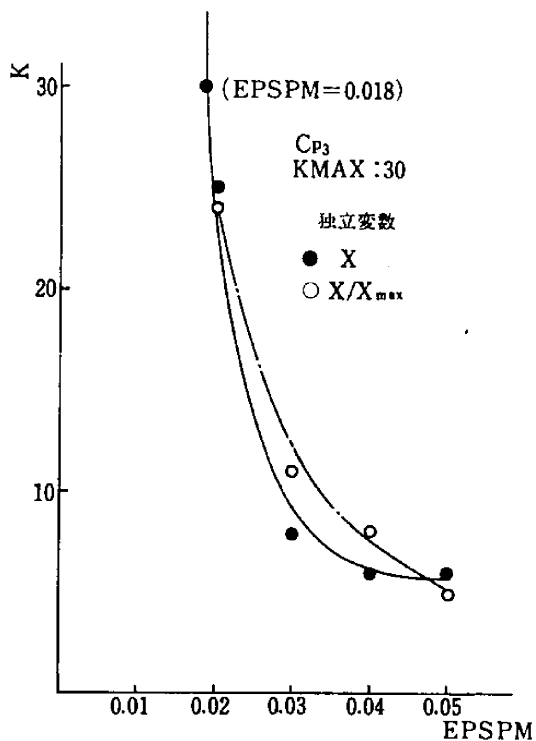


図 24 多項式の次数と収束精度の関係

このように最高近似次数 K_{max} を30とした場合、 $EPSPM=0.018$ すなわち標準偏差は1.8%が限度と考えられ、これ以上の分析精度の向上は実験精度の向上にまたねばならない。

7 結 論

非定常流測定用複合形プローブの特性検定を二次元の場合について実行した。近似特性多項式を直交系として計算能率を向上し、多項式次数、流れ方向の測定範囲および精度との関係さらに検定管路内の乱れとレイノルズ数が取圧部圧力に対して及ぼす影響などについて検討した結果、つぎの結論をえた。

(1) 供試プローブの圧力係数は流れの方向角度 $\alpha = \pm 60^\circ$, $R_e = 1.1 \times 10^4$, $EPS = 4 \times 10^{-4}$ の場合 14~24 次の多項式で近似された。

(2) 分析範囲 $\alpha = \pm 60^\circ$ より $\pm 30^\circ$ に限定した場合、多項式の次数を数次低減できた。

(3) 実用検定式を具体的に決定し $\alpha: 0.01$, $C_{p1}: 0.03$, $DC_{pA}: 0.04$ の精度をえた。

(4) 検定管内部乱れが粘性効果を減じていることを示した。

(5) 直交多項式による回帰分析により計算時間を従来の約 1/10 に短縮できた。

なお、本研究の遂行にあたり実験および図面作製に協力をえた卒研学生重松清誌、松垣和久の諸君に謝意を表す。

文 献

- 1) 松永ほか：機論 32-241 (S. 41.9), 1367.
- 2) 松永ほか：機構論 No. 730-6 (73.4), 25.
- 3) 富士通：FACOM 230-60, SSL, (S. 46.7), 169.
- 4) Goldstein, S.: Modern Developments In Fluid Dynamics (65), pp. 496~498, DOVER.

付表1 周波数分析流れ図記号

N	チャンネル数
NM	データ数
P	圧力
FSP	感度 mAq/mV
SB	零点 mAq
R	基本周波数
CP	圧力係数
CV	全圧管の速度係数
M	1 周期をM等分したときの個数M

MM	フーリエ係数の次数
F	周波数
SM1, SM2, SM3	フーリエ係数決定に必要なパラメータ
X	周波数成分指標値
A, B	フーリエ係数
S	脈動振幅
BO	フーリエ係数の定数項
BL	フーリエ係数の最高次係数

付表2 プローブ検定特性回帰分析計算の流れ図およびプログラムの記号

N	制御変数
KN	データ数
J3~J6	制御変数
CV	全圧管の速度係数
PSIDX	静圧指標値
VIDX	流速指標値
ALP	流れの方向角
PA	取圧系の指圧
CP	圧力係数
V	流速
VSA	流速平均値
PSA	静圧平均値
TPCE	全圧係数
X	指圧相関数
MM1, MM2	流れの方向角範囲の端点
KIZAMI, LIMIT	流れの方向角範囲の制御変数
KMAX	多項式の最高次数
EPSPM, EPS	多項式の収束精度
VX, VF	サブルーチンに組込む座標点
KM	座標点の個数
X1, Z	横座標 X1 により決定される多項式の値 Z
A, B, C, D	座標変換の係数
SA2~SA4	サブルーチンにより決定される多項式の係数およびパラメータ
K1	多項式の次数
ILL	サブルーチンから戻った状態を示す変数 ILL=0 が多項式近似の収束を示す
KNN1	流れの方向角の中心 ($\alpha=0^\circ$) を示す指標値
P	多項式
BSTAP	多項式を使って計算したプローブの特性値
HENSA	データと多項式の値との標準偏差
SIGMA	データと多項式の値との不偏分散推定量
BATPCE	多項式全圧係数