

UDC 621.375.826.093:
681.121:
681.3.02

航空宇宙技術研究所報告

TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TR-521

レーザー・ドプラー流速計データ処理方法の研究

五味光男・貴俵幸子・藤井昭一

1978年1月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

目 次

1. 緒 言	1
2. 従来のデータ処理方法	2
3. 信号出力特性	2
3.1. レーザ流速計の概要	2
3.2. デジタル処理システム導入上の問題点	8
4. 速度信号抽出機構	10
4.1. サンプラーの機能	10
4.2. データサンプリング	12
4.3. 効 果	14
5. データ処理方法	14
5.1. データファイルの作成	14
5.2. 解 析	15
6. 測定精度	15
6.1. 不良データ	15
6.2. データサンプリング数	16
6.3. 機器の精度	16
7. 応用例ー熱線風速計との比較ー	18
7.1. 熱 線	18
7.2. 噴流における測定例	18
7.3. 考 察	19
8. 結 論	20
付 録	
A ; 周波数シフト方法の原理と測定例	22
B, C, D ; データ処理フローチャートおよびプログラム例	25

レーザー・ドプラー流速計データ処理方法の研究*

五味光男**、貴俵幸子***、藤井昭一**

A Method of Laser Velocimeter Data Processing

By Mitsuo GOMI, Sachiko KITAWARA
and Shoichi FUJII

ABSTRACT

A unique single-particle processor for a frequency-offset laser velocimeter tracker has been devised. This paper describes both principle and application to turbulent flow measurements. Errors inherent in the laser velocimeter are also considered and evaluated.

The main features of the single-particle processor are as follows;

- (i) picks up only one signal per particle as the particle passes through a measuring volume in the usual optical alignment.
- (ii) accuracy of measured data may be improved through use of a processor particularly in highly turbulent flow measurements.

1. 緒 言

レーザー・ドプラー流速計 (Laser Velocimeter, 以下「レーザ流速計」と呼ぶ) は, Yeh & Cummins¹⁾ によって1964年にその実用化が報告されて以来, 流体に非接触でその速度を測定できるという点で, 従来の熱線流速計等に比較して著しい特長を有する点が注目され, 近年光学系および信号処理系で発達を遂げ一部専門家の手を離れ次第に多方面の研究分野に普及されつつある。特に従来の流速測定器では困難であった高温流体の測定および逆流域を含む流れの解明にその効果が期待され米国をはじめ諸外国においてはすでに多くの研究者によってレーザ流速計を用いた意欲的な研究が進められている。わが国では最近になって多次元解析装置や再循環領域などの測定ができる周波数シフト装置などを備えた優秀なレーザ流速計が普及しつつあるが, その応用例はまだ緒についたばかりである。

レーザ流速計はすでにいくつかの解説^{2,3,4,13)}などで広く知られているように, 流体中に混入された微粒子 (1 μm 程度) にレーザ光を当て, 流速に比例したドブラ

ー偏移周波数 (以下「ドプラー周波数」と呼ぶ) を検出して粒子速度が流体の速度と同等であると考えるところによって流速を知るという原理にもとづいている。ところが一般に市販されているレーザ流速計においては, 微粒子によって生ずる散乱光強度の周期変化を光電変換装置を介して信号処理器 (signal processor) でドプラー周波数として検出し, 電圧に変換して流速情報として出力するに止まる。信号処理器以後のデータ処理方法はユーザが測定目的に合わせて独自に考案しなければならないのが実状である。

本稿で取りあげるテーマは, この信号処理器からの信号をどのように処理して目的とする流体の流れの解析を行なうかという問題であり, 独自に開発した技術およびそれを利用したデータ処理システムを紹介し, その応用例について報告する。

記号の説明

$A, (A)$:	トラッカー出力信号 (速度信号)
$B, (B)$:	" (同期信号)
d	:	干渉縞間隔の大きさ
E	:	サンプラー出力信号 (外部クロック信号)
f_a	:	収束レンズ焦点距離

*昭和52年11月7日 受付
**航空機公害研究グループ
***原動機部

f_c	: 電圧制御発振器-2からの出力周波数(中心周波数)
f_D	: ドブラー周波数
f_M	: 電圧制御発振器-1からの出力周波数
f_s	: シフト周波数
f_v	: 粒子速度を表わす周波数
F_f	: flatness factor (11式)
N, N_s	: バースト信号中の波数
n	: データサンプリング数
S_f	: skewness factor (10式)
t_1, t_2, t_i	: 出力信号間隔時間
t_p	: 粒子間隔時間
t_a	: 速度信号取りこみに要する時間
U	: 速度
\bar{U}	: 平均速度
U_1, U_2, U_3	: レーザ光回転面方向速度成分
$\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3$: " 平均速度成分
$\Delta U_1, \Delta U_2, \Delta U_3$: " 乱流速度成分
\bar{u}, \bar{v}	: x, y 方向平均速度成分
u', v'	: x, y 方向変動速度成分
$\overline{u^2}, \overline{v^2}, \overline{u'v'}$: レイノルズ応力
$V_{F/V}$: $F-V$ コンバータ出力電圧
V_{out}	: トラッカー出力電圧
V_p	: 粒子速度(干渉縞に垂直な速度成分)
V_{PLL}	: PLL 回路出力電圧
α	: 外部クロック信号を出力するための遅延時間
τ	: 出力信号間隔時間判定基準
ϵ	: 任意定数(9式)
λ	: レーザ光波長
θ	: レーザ光交叉角
σ	: 標準偏差値
添字 i	: 個数を表わす。

2. 従来のデータ処理方法

レーザ流速計のデータ処理方法に関しては大別して

- 1) アナログ的処理方法
- 2) デジタル的処理方法

とに分けられる。どちらの方法を用いるかは測定目的や信号処理器の特質などによって決められる。アナログ的処理方法としては信号処理器からの出力を直接、スペクトルアナライザ、電圧計、オシロスコープ、ペンレコーダなどを用いて処理する方法で、例えば浅沼ら⁵⁾は内

燃機関のシリンダ内の流速の実時間変動の測定に電磁オシロを使用して解析を行ない、池田ら⁶⁾は乱流測定にRMS計を使用して解析を行なっている。このようにアナログ的処理方法は手軽な場合も多いが粒子濃度およびその均一性等が極めて理想的で、かつ信号の外乱条件を厳しく排除し、信号処理器および計測機器に周波数特性の良いものを使うなど特別な配慮が必要である。この観点から見ると先に挙げた処理法^{5,6)}は疑問が残る。一方デジタル的処理方法では特に高速流の測定において信号処理器からの出力レートが非常に高速になりかつ、出力の時間的間隔がランダムとなるので、これに対応するコンピュータ又はA/Dコンバータなどの選択が難しい問題となる。また莫大な粒子数による情報を記憶する装置やソフトウェアの開発も必要となる。この線に沿ったものとしてRoseら⁷⁾の乱流解析法があるが処理装置の詳細については一切不明である。

そこで以上の諸問題を勘案し、当部で購入したレーザ流速計のアナログ出力形態を有する信号処理器(トラッカータイプ)を前提に、A/Dコンバータを有する記憶装置を介してコンピュータに接続しデータ処理を行う独自の方法を考案する。なお本装置は、サンプラーおよびコンピュータ以外はTSI-KANOMAX Model 27-seriesである。

3. 信号出力特性

本項においては、使用したレーザ流速計の諸特性についてその概要を述べ、特にデータ処理方法開発に重要な信号出力特性の問題点について明らかにする。

3.1 レーザ流速計の概要

1) 構成

レーザ流速計は基本的に1)レーザ光線発光部、2)受光部、3)信号処理部から成っており、さらに負の速度を測定するための周波数シフト装置、二次元流れ測定のためのレーザ光線分光器回転機構と偏波面回転器から構成され、その構成系統図を図1に示す。信号処理器としてはトラッカータイプを用いている。構成諸機器毎の仕様の概略を表1に示す。

2) 測定方法

光学系の配列により多くの測定方法があることが紹介されている²⁾が本装置は2ビームモード(two beam mode又はdual beam mode)による測定方法のために製作されている。本方法は現在もっとも一般的に使用されている方法で、1本のレーザ光線を分光器(beam splitter)で分光し、これをレンズを用いて再び収束させ被測定流体中に2本の光線の交叉部(sampling volume

表1 レーザ流速計(TSI-KANOMAX 27-Series)の主な仕様

発 光 部	1. レーザーソース(He-Ne, SPECTRA PHYSICS, MODEL 124A) 1) 出力 : 15 mW 2) 波長 : 6328 Å
	2. 分光収束器(MODEL 27-0910) (1) 分光器(ビームスプリッタ) 1) ビーム平行間隔 : 50 mm, 22 mm 2) ビーム回転 : 45°±0.5°ステップ 360°回転 3) 分光強度比 : 50%:50%又は99.5%:0.5% 4) 光量フィルター : 連続可変光量フィルター内蔵 (2) 収束レンズ(反射防止コーティングレンズ) 1) 収束角θ : 25.50° 2) " θ : 11.68° 3) " θ : 4.90°
	3. 偏波面回転器(MODEL 27-0901) 1) 適用波長 : 6328 Å
	4. 周波数シフトシステム(MODEL 27-0980) (1) 光学ユニット 1) 許容レーザービーム出力 : 最大2W 2) 光損出 : 2dB以下 3) 許容レーザービーム径 : 最大2mm ^φ 4) 波長範囲 : 4000~12000 Å (2) ミキサユニット 1) 入力電圧範囲 : 70 μV-700 mV RMS 2) 出力周波数範囲 : 2 KHz~25 MHz 3) 実効シフト周波数 : 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1., 2., 5., 10., 20. MHz
受 光 部	1. 散乱光集光レンズ 1) 焦点距離 : 104.8 mm 2) " : 242.9 " 3) " : 582.0 "
	2. フォトマルチプライヤ(MODEL 27-0960) 1) 量子効率 : 13%/6328 Å 2) 陰極感度 : 300 μA/ルーメン 3) 総合増幅感度 : 40000 V/ルーメン 4) アパチャー : 250 μm ^φ 5) 帯感幅 : 2 KHz~100 MHz 6) 電源ユニット出力電圧 : 300~1200 V可変

表1 レーザ流速計 (TS I-KANOMAX 27-Series) の主な仕様 (つづき)

トラッカー (MODEL 27-1090 A)		
信号処理部	1. 入力	1) インピーダンス 50 Ω 2) 周波数特性 2 KHz ~ 50 MHz
	2. レンジ	レンジ 周波数範囲 出力 キャプチャ巾 1) H. F. 0.5 ~ 50 MHz 0.1 V/MHz 5 MHz 2) M. F. 0.02 ~ 5 MHz 1 V/MHz 0.5 MHz 3) L. F. 0.002 ~ 0.5 MHz 10 V/MHz 0.05 MHz
	3. トラッキングモード	手動および自動
	4. 周波数応答	レンジ スリューレート キャプチャ巾内 1) H. F. 400 MHz/ms 100 KHz 2) M. F. 10 MHz/ms 50 KHz 3) L. F. 100 KHz/ms 5 KHz
	5. ダイナミックレンジ	H. F. = 100 : 1, M. F. = 250 : 1, L. F. = 250 : 1
	6. 精度	フルスケールの 0.4 %
	7. 雑音	1) 入力 S/N -6 dB 2) 出力 H. F. 7 mV RMS 以下 (DC ~ 100 KHz) M. F. 3 mV RMS 以下 (DC ~ 50 KHz) L. F. 2 mV RMS 以下 (DC ~ 5 KHz)
	8. データ出力レート	出力電圧 2 V 以上では、フルスケールの入力周波数 × 0.04 の割合で、出力電圧 2 V 以下では入力周波数 × 0.1 の割合で出力される。
	9. 出力	1) アナログ出力 各レンジ共 0 ~ 5 V 2) インピーダンス 20 Ω 3) 信号処理確認用信号 TTLレベルパルス 4) デジタルボルトメータ (± 10V)

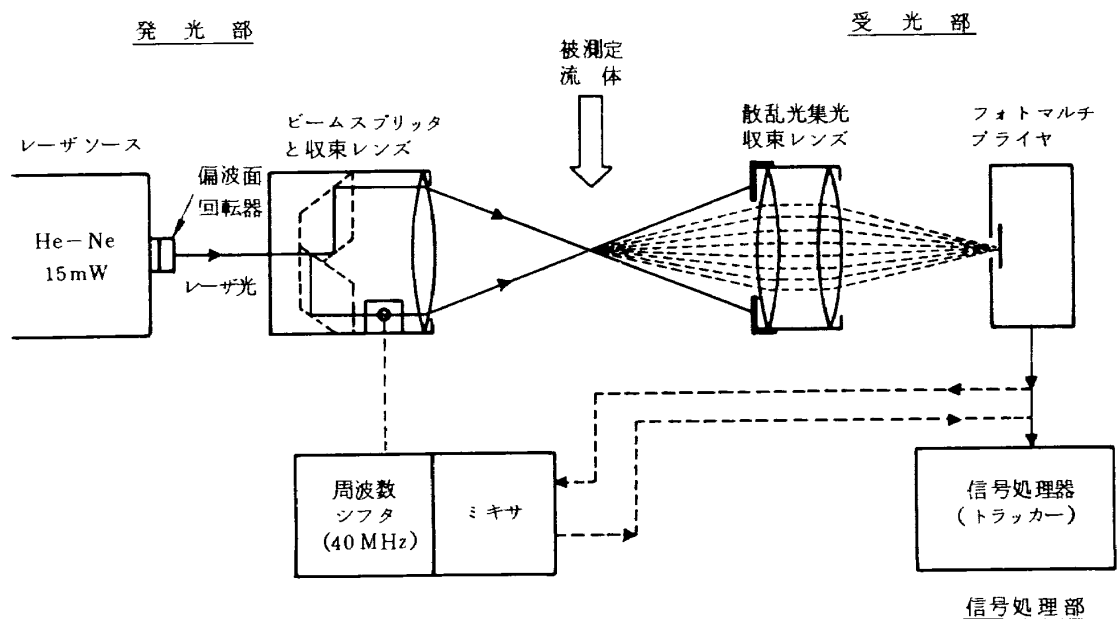


図1 レーザ流速計構成図

又は measuring volume) をつくる。この交叉部を微粒子が通過する際に生ずるドブラー周波数を検出する方法である。ドブラー周波数を生ぜしめかつこれを検出器に導く方法として、さらに①干渉縞法 (fringe mode), ②参照光法 (reference beam mode) とよばれる二つの方法がある。前者は2本のレーザ光線を等強度にして交叉させることによって交叉部に干渉縞を生ぜしめる (図2)。この干渉縞中を微粒子が通過すると干渉縞の明暗によって散乱光強度の周期変化が生じこれを受光器で受け、さらに光電変換すると図3のような信号が得られる。これを今後「バースト信号」と呼ぶ。次に後者は2本のレーザ光線のうち予め一方を強い光線にし、他方をこれより強度が1/100 程度の弱い参照光線にして両光線を交叉させる。交叉部を微粒子が通過すると強い光線によって生ずる散乱光は微粒子速度に比例したドブラー偏移を生ずるのでこの散乱光と参照光線を受光面上で重ね合わせ光電変換装置を用いて、図3と同じドブラー周波数の信号を得る。しかし調整が容易である点や後方散乱方法でも使用できるなどの利点から干渉縞法が一般にも多く使用されている。

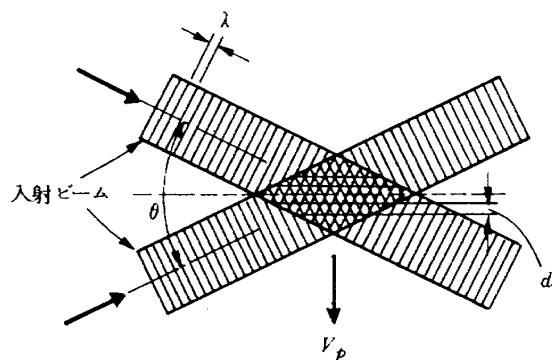


図2 レーザ光交叉部に生ずる干渉縞 (フリンジ)

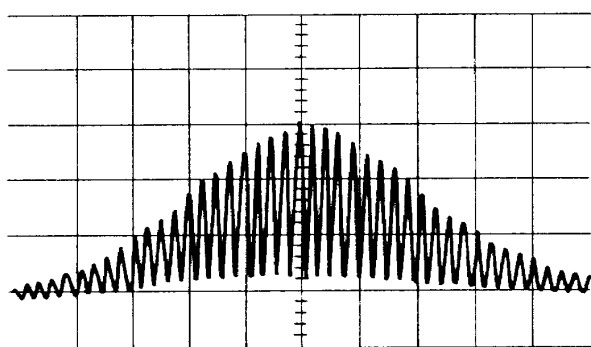


図3 バースト信号

さて干渉縞法において、ドブラー周波数 f_D を検出、確定すれば、粒子速度 V_p は干渉縞の間隔 d を用いて

$$V_p = d \cdot f_D \quad (1)$$

と表わされる。ここで d はレーザ光の波長 λ , レンズによって収束される2本のレーザ光の交叉角 θ によって

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)}$$

と表わせるから(1)式は一般式として次のように書きなおせる。

$$V_p = \frac{\lambda \cdot f_D}{2 \sin(\theta/2)} \quad (2)$$

V_p と f_D とは簡単な直線関係で表わされ θ を決定すれば、 f_D を測定することにより容易に V_p が決定できる。 $V_p - f_D$ 線図を図4に示す。なお交叉部の大きさについては後述する (§ 6.3)

3) 信号処理器の出力特性

光電変換装置を介して得られるバースト信号は信号処理器 (以下トラッカー) に導き、ドブラー周波数 f_D を検出し、周波数-電圧変換器を介して電圧で出力される。図5に示す回路図をもとに本器の作動を簡単に説明する。入力した周波数 f_D は混合器で電圧制御発振器 (V.C.O-1) からの出力周波数 f_M と混合され、 $f_M - f_D$ となる。さらにバンドパスフィルター (B.P.F) を通過させた後 PLL 回路 (Phase Locked Loop) に導く。ここでは V.C.O-2 によって発振する中心周波数 f_c との混合を行い、 $f_c - (f_M - f_D)$ を得る。この周波数の差を電圧に変換した V_{PLL} と $(f_M - f_c)$ を電圧に変換した値 $V_{F/V}$ とを加えて、 $V_{out} = V_{F/V} + V_{PLL} (= f_D)$ として出力する。通常使用時は PLL 回路で検出された f_c からの差に比例する電圧が V.C.O-1 にフィードバックされ f_M が f_D に自動的に追従する様設計されている。図6に $f_D - V_{out}$ 線図を示す。

さて、トラッカーへの入力信号は微粒子に依存するので間欠信号となる。したがってこうした処理方法では1回毎に出力信号がドロップアウトしてしまうので有効化回路により、一定時間出力信号が保持されるように構成されている。図7が回路図、図8が原理図である。入力信号に対し、しきい値を越えた点から周波数カウントを行ない8サイクルをカウントした時点での周波数の内容をあとの2サイクルの時間内で前の情報と変動がなければ流速情報として出力し、次の情報が出力されるまでの時間その情報が保持される。ただし長い時間放置されると減衰する。すなわち10サイクル毎に1個の信号が出力され一定時間保持される。さらにこの際速度情報の出力と同時にそれに同期した同期信号が出力されるのが本器

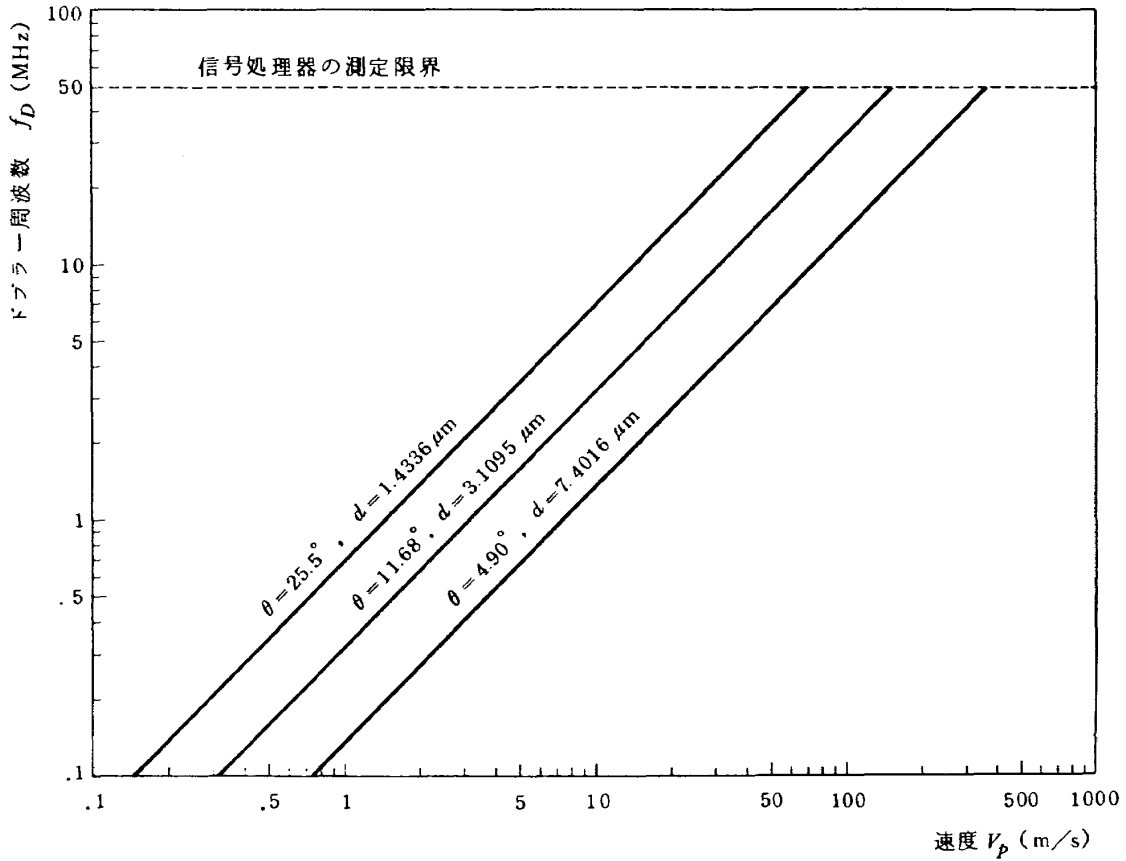


図4 $V_p - f_D$ 線図

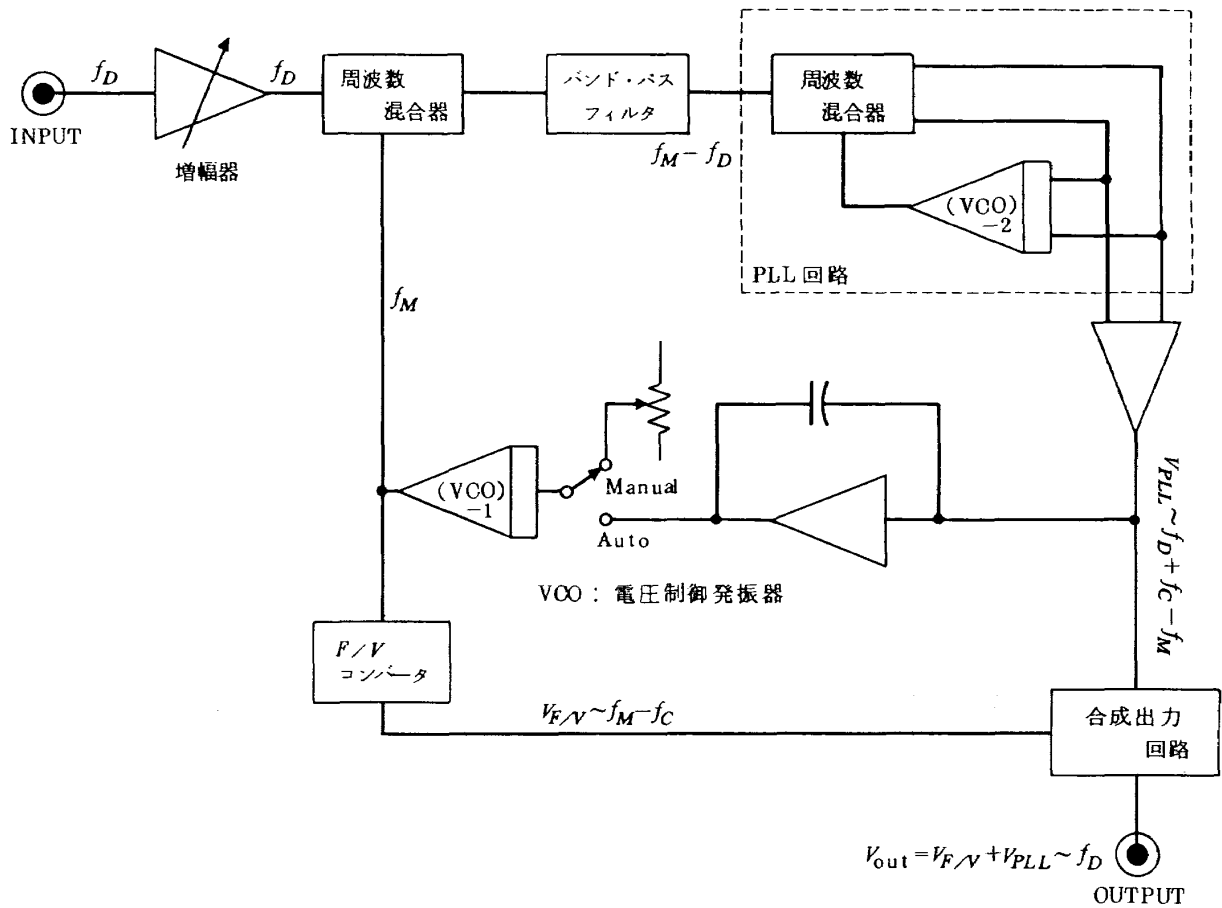


図5 トラッカー基本回路図

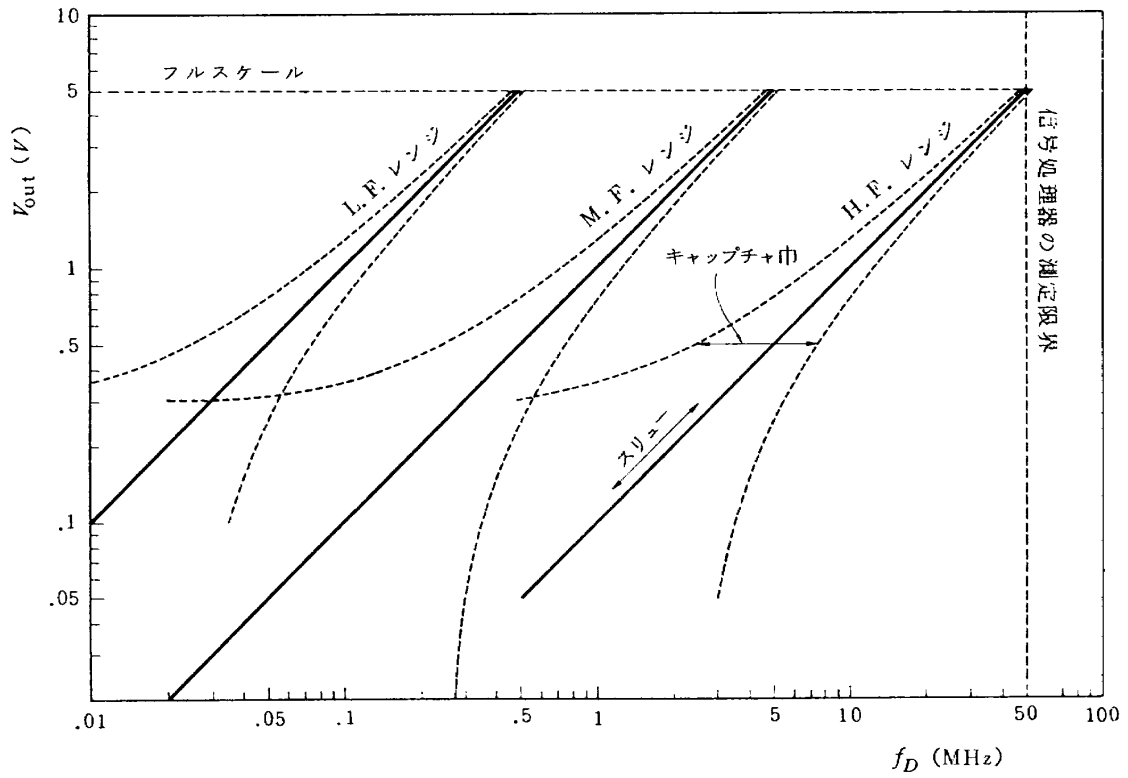


図6 $f_D - V_{out}$ 線図

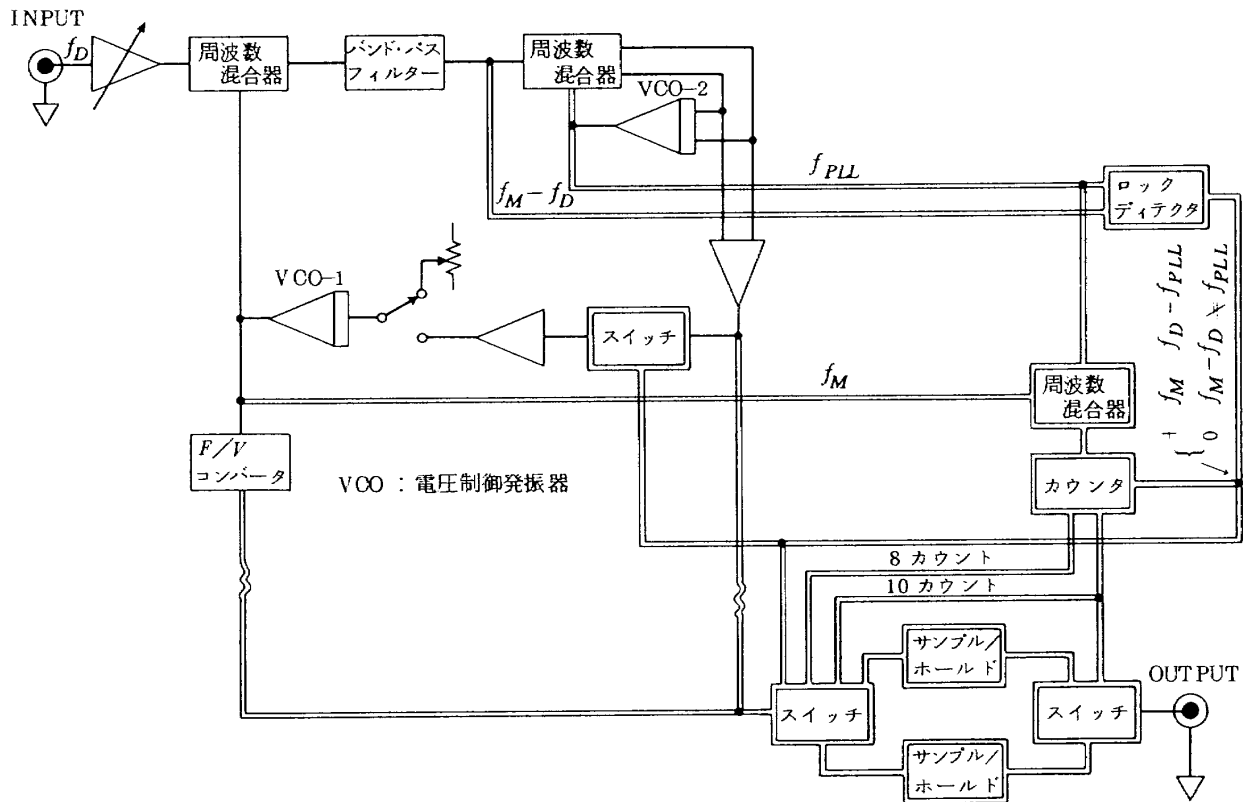


図7 信号有効化回路図

の大きな特徴でもある。今後この出力のうち、速度の情報を出力する端子をA、その情報を速度信号(A)とよび、同期信号を出力する端子をB、その情報を同期信号(B)と呼びAおよびBを総称して出力信号とよぶ。ただし本器はいかなる入力信号に対しても、その周波数の1/10の割合で信号が出力されるのではなく、例えばM.F.レ

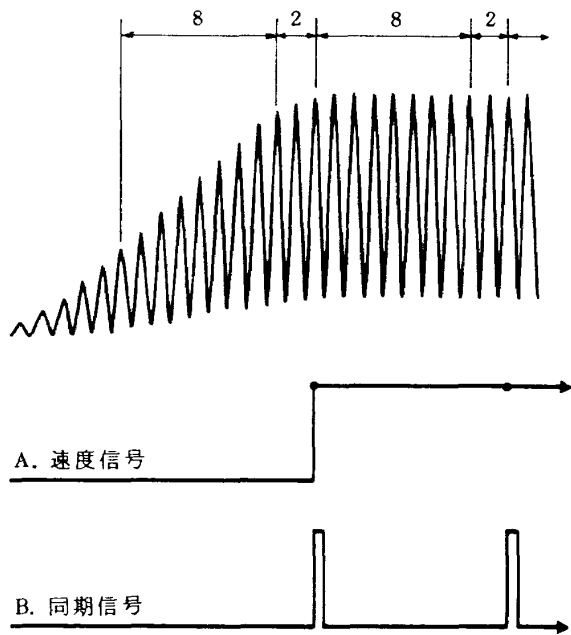


図8 信号有効化回路原理図

ンジ(0.02 MHz~5 MHzの範囲で測定できるレンジ)では、0.02~2 MHzまでのドブラー周波数に対しては1/10の出力であるが2~5 MHzに対しては、フルスケールの4%すなわち(5 MHz/10)×0.4の一定割合で出力される(図9)。H.F.およびL.F.レンジも同様である。

3.2 デジタル処理システム導入上の問題点

上述の測定方法並びにトラッカーの信号出力特性を吟味し、デジタル処理システムを導入する上での問題点を抽出する。

1) 信号出力レートの高速性およびランダム性

トラッカーの信号出力レートは最高 2×10^6 回/sec ($f_D \geq 20$ MHz)で設計されており、連続的な出力状態では信号間の時間間隔は0.5 μ secとなる。一方粒子濃度分布が一様でない場合は間欠的となり信号間の時間間隔は数10 msec程度となる場合も起り得る。このような高速かつランダムな時間間隔で発生するアナログ速度信号のサンプリング方式を考案する必要がある。

2) 個々の微粒子による信号出力数の違い

a) 粒子による散乱光の強弱によって生ずる場合

散乱光が強ければ、全体のレベルが高く、したがってしきい値以上の捕捉できる波数の多いバースト信号が得られ、反対に散乱光が弱ければ、捕捉できる波数の少ないバースト信号となる(図10)。この結果、同じ1個の

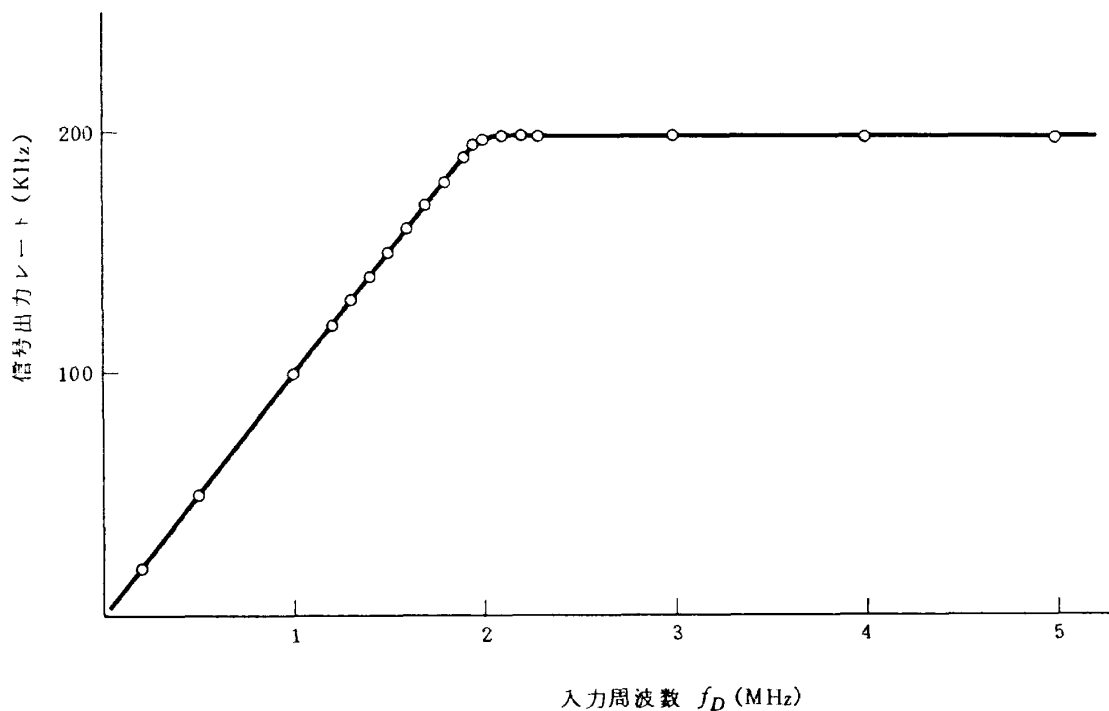


図9 トラッカー信号出力レート (M.F.レンジ)

微粒子からの信号ではあってもトラッカーの出力特性により散乱光の強い微粒子からは多数個の出力信号が、また散乱光の弱い微粒子からは少数個の出力信号しか得られない。これは、統計処理を基本とする方法においては誤差を生む要因となる。こうした散乱光強度は微粒子の大小、形状、および物性（反射率等）によって生ずるので、注意深く微粒子を選択すると共に、混入方法を工夫すればある程度一様性は保障できようが、そうした条件を確認するまでの労力は大きく、かつ実験条件の変化などに対する制約が多い。

b) 周波数シフト装置を用いた測定の場合

周波数シフト装置は、正負の速度が混在する再循環流域などの測定ができるもので、後述（付録A参照）のような原理に基づき、レーザー光交叉部に生ずる干渉縞が移動する。したがって1個の微粒子が交叉部内を通過する時の波数 N は次式によって与えられる。

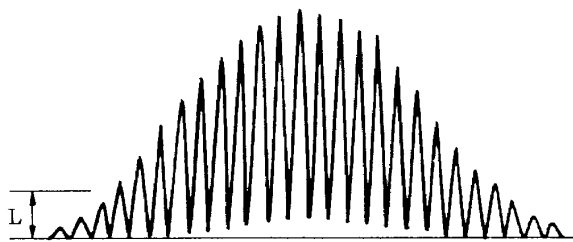
$$N = N_s | (1 + f_s / f_v) | \quad (3)$$

N_s : 周波数シフトをしない場合に生ずる波数

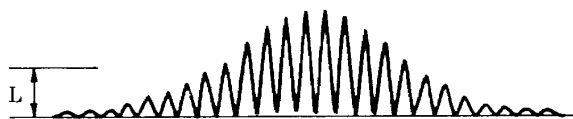
f_s : シフト周波数

f_v : 粒子速度を示す周波数

すなわち、干渉縞が粒子と同じ方向に進んだ場合 ($-f_s$) はバースト信号上の波数 N は少なくなり（図11(b)）反対に干渉縞が粒子と逆の方向に進んだ場合 ($+f_s$) は波数は多くなる（図11(c)）。粒子が交叉部内をゆっくり進むか早く進むかでも波数は異なり、交叉部内で停止している場合には無限に出力される。このようにたとえ微粒子間の散乱光強度が一様だと仮定しても、微粒子の速度の大きさおよびその進行方向によって出力信号数が必然的に異



(a) 散乱光強度が大きい場合



(b) 散乱光強度が小さい場合

図10 粒子の散乱光強度の大小によるバースト信号の差異 (L:しきい値)

なり、この情報を画一的に統計処理すれば大きな誤差を生ずる。

3) 不確実信号

トラッカーの出力は周波数応答の限界から微粒子間の速度変化が大きい場合速度信号が所定の電圧に立上るまでに時間遅れが生ずる。図12は発振器によってトラッカーへの入力周波数 $f_D = 5 \text{ MHz} \rightarrow 8 \text{ MHz}$ に変化させた場合で立上りに $4 \sim 5 \mu\text{sec}$ を要する。この間速度信号は間隔 $10/8 \mu\text{sec}$ で出力されているが約3回分が所定の電圧に立上り切れない不確実信号である。このような周波数応答の遅れから生ずる不確実信号を除去する必要がある。

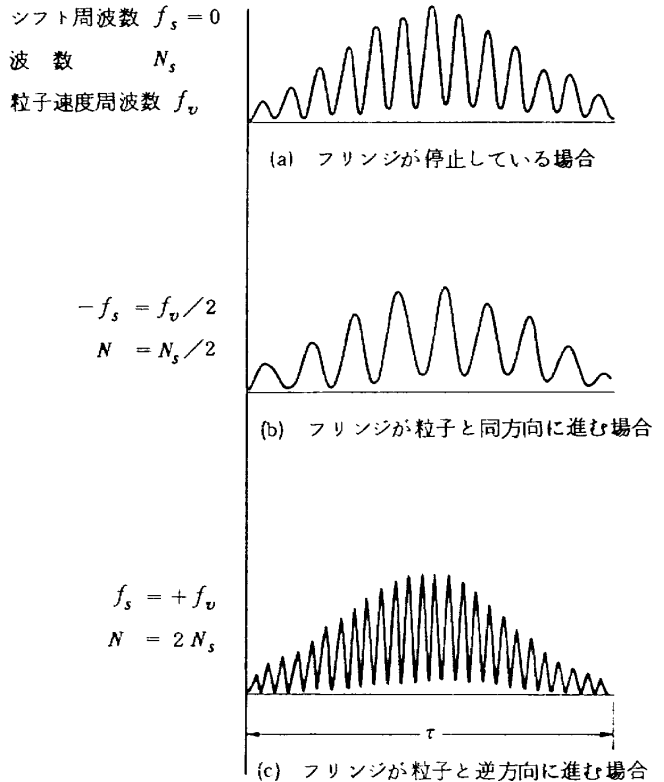


図11 フリンジの移動方向によって生ずるバースト信号の波数の差異

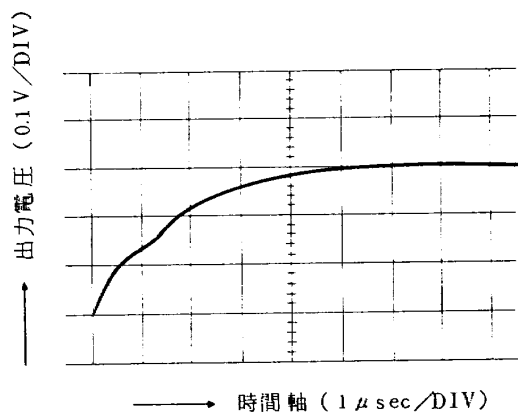


図12 出力電圧の応答性

4. 速度信号抽出機構

本項では上述の諸問題を解決する方法として筆者らが考案した「レーザ流速計用信号抽出方法」を中心に述べる。構成はサンプラーおよびトランジェントレコーダより成っており概略構成図を図13に示す。本方法は周波数応答の遅れを除去し、かつ1粒子当り1個の速度信号を抽出する。ただし粒子が連らなって交叉部内に入り、あたかも1個の粒子によるバースト信号と同様な場合は1粒子の信号とみなす。

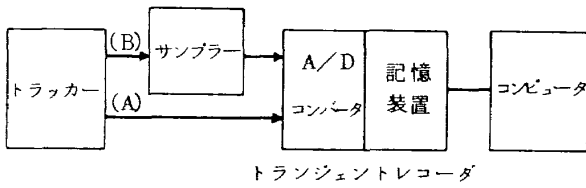


図13 レーザ流速計用信号抽出機構概略図

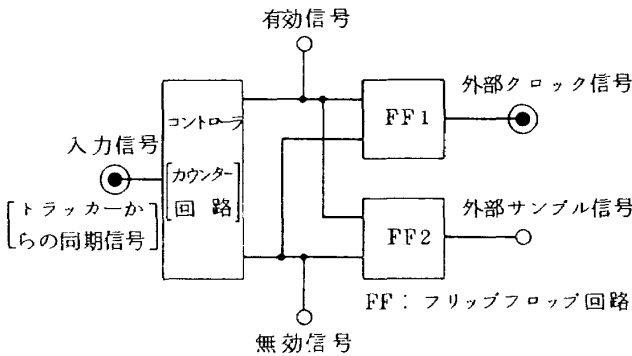


図14 サンプラー構成概略図

4.1 サンプラーの機能

サンプラーは本機構の中核機器で計数回路を中心として成っており概略ブロック図を図14に示す。トラッカーからの同期信号(B)を入力としその時間間隔を判別し、新しい外部クロック信号(E)を出力することが主な機能である。

図15は動作原理を示すタイミングチャートで、まず、カウンタにより同期信号の時間間隔を順次測定し比較する。ただしカウンタクロックはトラッカーレンジに対応し $0.1 \mu\text{sec}$ (H.F.), $1 \mu\text{sec}$ (M.F.), $10 \mu\text{sec}$ (L.F.) で選択できる。予め定数 r を設定し $|t_2 - t_1| / t_1 \leq r$ であればこれらの同期信号はいずれも同一粒子からの信号であると判定し、 $|t_2 - t_1| / t_1 > r$ であれば別の粒子の信号が入ったと判定する。粒子濃度が非常に高ければ同期信号間隔と粒子間隔とがほぼ等しくなるが、逆に乱流測定時には交叉部内に速度の異なる複数個の粒子が同時に存在しそれぞれの情報が合成されたいわばノイズ信号となる割合も増加するので $t_i \ll t_p$ の関係で測定の方が好ましいと考えられ、この方が他粒子の判別も容易である。そこで r は交叉部内での粒子速度の変化量を想定して決めればよいが、本装置の場合は大きめであるが $r = 0.5$ または 1.0 を選択できる。この判定基準に基づき同一粒子からの信号であると判定すれば有効信号を出力し、他粒子信号が入力したと判定すれば無効信号を出力する。この結果最初から2個の同期信号に対応して無効信号が、3個目から有効信号を出力することになる。動作確認を行なった結果を図16および図17に

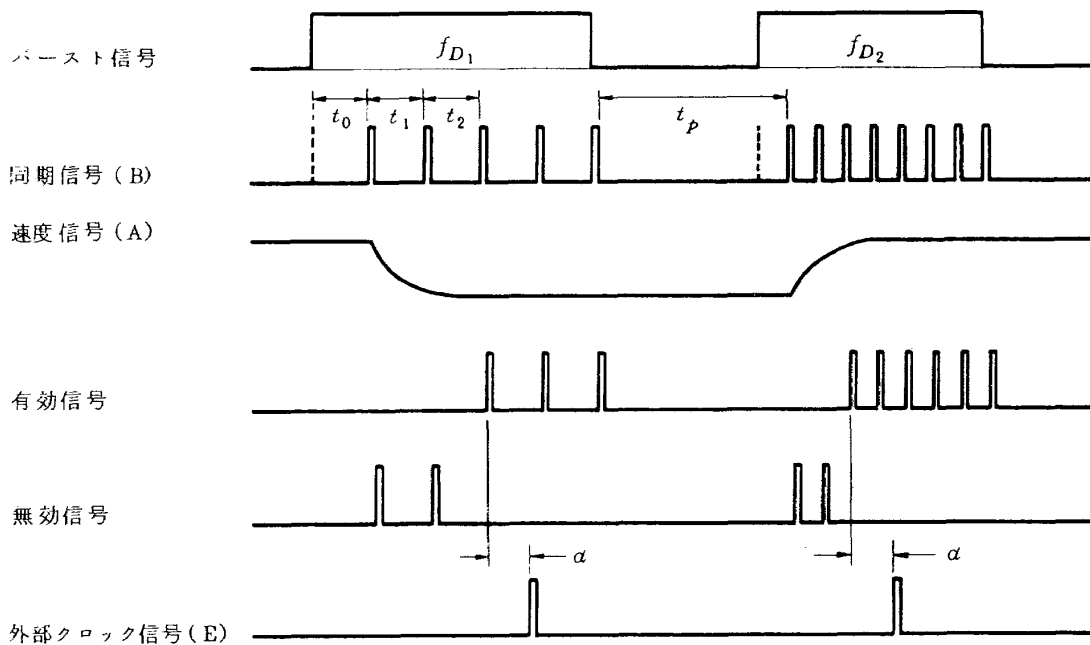


図15 速度信号抽出タイミングチャート

示す。図16は有効信号の出力状態、図17は無効信号の出力状態で、いずれも粒子を4個と仮定し、それぞれのドブラー周波数 $f_D = 5\text{ MHz}, 10\text{ MHz}, 10\text{ MHz}, 5\text{ MHz}$ とし、粒子間隔時間は発振器の切換時間で置き換え、トラッカーに入力した。 $t_i = 1\ \mu\text{sec}$ ($f_D = 10\text{ MHz}$) および、 $2\ \mu\text{sec}$ ($f_D = 5\text{ MHz}$)、 $t_p = 4 \sim 10\ \mu\text{sec}$ 、 $\gamma = 0.5$ である。次に無効信号に続く最初の有効信号から予め設定する時間 $\alpha\ \text{sec}$ 後に外部クロック信号 (E) を1回だけ出力する。これがサンプラーの最終出力信号となり、最初の同期信号が入力してから E が出力されるまでの時間は

$$t_a = t_1 + t_2 + \alpha \quad (4)$$

となる。

α は速度信号の立上りに要する時間に見合った値を考慮する必要がある。この遅れ時間はトラッカーのキャプチャ巾最大で f_D を変化させて観測した結果約 $5\ \mu\text{sec}$ であり、最大出力レート $t_1 = t_2 = 0.5\ \mu\text{sec}$ の場合遅れ時間を除去するためには $\alpha \approx 4\ \mu\text{sec}$ となる。これは最も厳しい条件であり、通常使用時の粒子間の速度変化が比較的少ない場合には時定数の影響が少ないので、できるだけ前の情報をとりこむ方がよく α はもっと小さい値が好ましい。本装置では $\alpha = 1.5\ \mu\text{sec}$ または $3.5\ \mu\text{sec}$ を

選択できる。この結果速度信号のとりこみのタイミングは E に同期した点となる。このサンプラーの最終的動作確認を行なった。まず $f_D = 10\text{ MHz}, 10\text{ MHz}, 5\text{ MHz}, 10\text{ MHz}$ の4個の粒子情報を想定し粒子間隔時間に発振器の切換時間を当てトラッカーに入力し、 $\alpha = 1.5\ \mu\text{sec}$ の時の結果を図18(a)に、 $\alpha = 3.5\ \mu\text{sec}$ の時の結果を図18(b)に示す。

$\alpha = 1.5\ \mu\text{sec}$ では E が No. 3 \rightarrow No. 4 粒子間の立上りにややかかっているが、 $\alpha = 3.5\ \mu\text{sec}$ の場合は充分立上った時間軸上に位置していることが確認できる。図19は、 $f_D = 1\text{ MHz}, 1\text{ MHz}, 0.5\text{ MHz}, 1\text{ MHz}$ 、 $\alpha = 1.5\ \mu\text{sec}$ の場合で E はほぼ満足すべき位置にある。図20はさらに f_D を下げ、 $f_D = 0.1\text{ MHz}, 0.05\text{ MHz}$ にした場合で、これも $\alpha = 1.5\ \mu\text{sec}$ で問題はない。

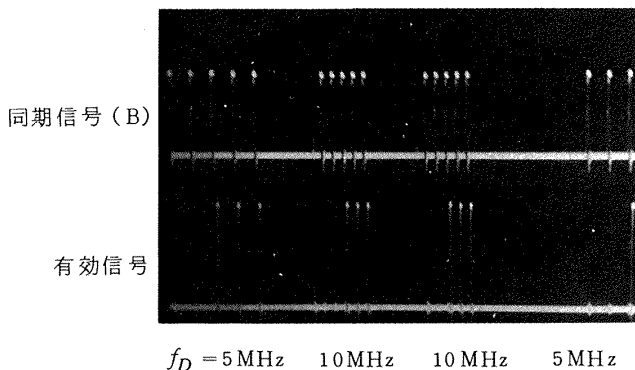


図16 有効信号の出力タイミング

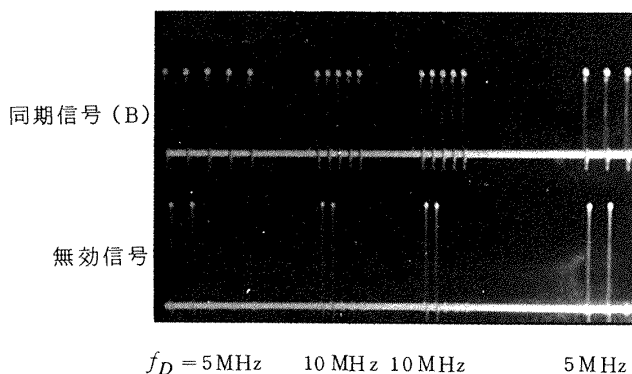


図17 無効信号の出力タイミング

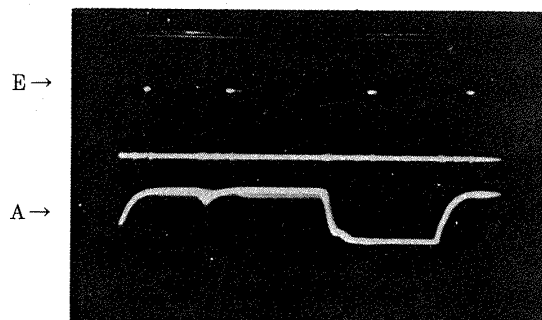


図18(a) 外部クロック信号出力タイミング(1)

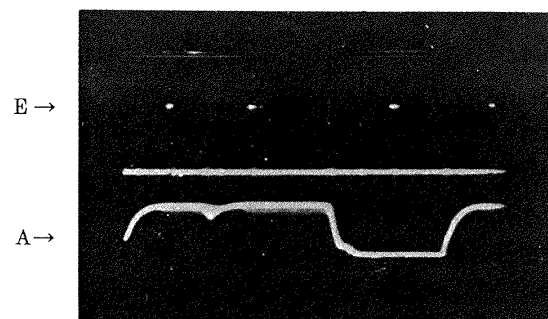
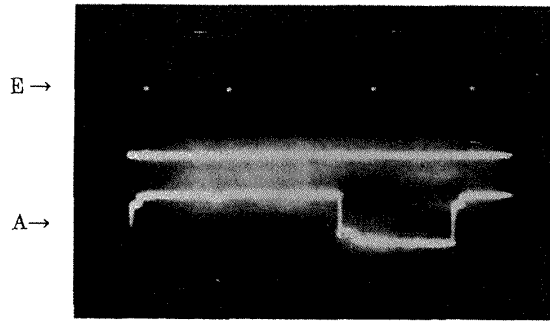
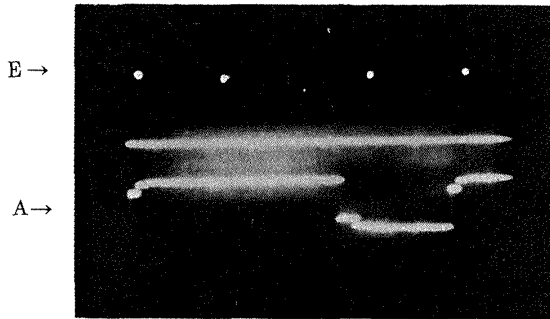


図18(b) 外部クロック信号出力タイミング(2)



トラッカー M. F. レンジ
 $(f_D)_1 = 0.5\text{MHz}$, $(f_D)_2 = 1\text{MHz}$
 $\alpha = 1.5\ \mu\text{sec}$, $\gamma = 0.5$

図19 外部クロック信号出力タイミング(3)



トラッカー L. F. レンジ
 $(f_D)_1 = 0.05\text{MHz}$, $(f_D)_2 = 0.1\text{MHz}$
 $\alpha = 1.5\ \mu\text{sec}$, $\gamma = 0.5$

図20 外部クロック信号出力タイミング(4)

4.2 データサンプリング

トラッカーからの速度信号(A)およびサンプラーからの外部クロック信号(E)を用いて、1粒子につき1個の速度信号の抽出を直接行なうのは、外部サンプリング方式によるトランジェントレコーダである。本器はA/Dコンバータおよび記憶装置とから成っている。この内容はさらにコンピュータへと転送される。トランジェントレコーダおよびコンピュータの主な仕様を表2に示す。

実際の乱流場におけるデータサンプリング例を紹介する。吸入式の噴流中にかく乱物体(金鋼状)を置き(図21)その後流で測定した。シーディングは水蒸気(超音波発生器による)で測定方法は、①トラッカーからの速度信号(A)を直接内部サンプリング方式で取り込んだ場合、②トラッカーからの同期信号(B)を直接外部サンプリング方式のトリガー入力にして、出力されるAをその都度すべて取り込んだ場合、③サンプラを介して1個/粒子の速度信号を抽出して取り込んだ場合について、取り込んだデータを再びD/Aコンバータを介してオシロ

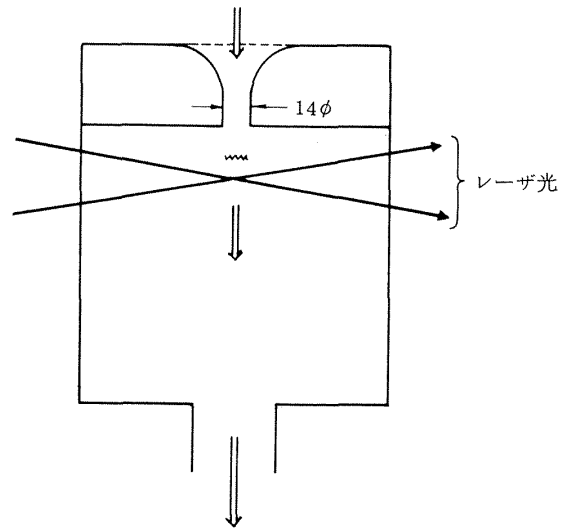


図21 流速検定装置

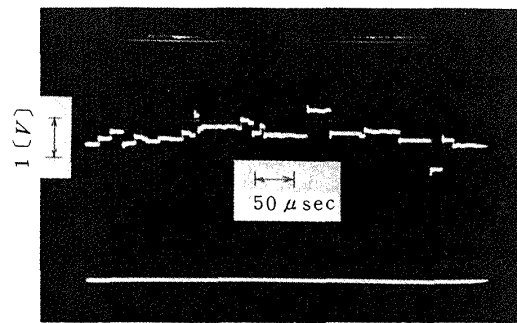


図22 内部サンプリング方式によるデータサンプリング
 (サンプリングタイム 500 μsec)

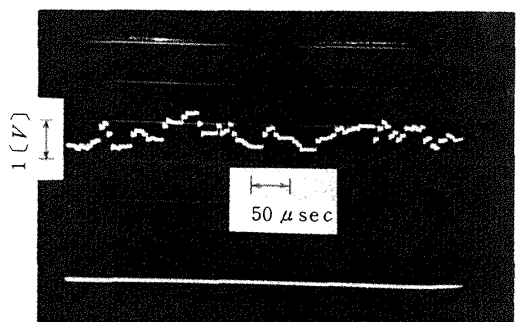


図23 同期信号(B)を利用した外部サンプリングによるデータサンプリング

スコープで観測した。図22は①の結果を示す。これは通常トラッカーからの速度信号(A)を直接オシロスコープで観測した結果と同様で、すでに述べたように粒子間の時間間隔が大きくその間電圧が保持されているため不規

表2 トランジェントレコーダおよびコンピュータの主な仕様

ト ラ ン ジ ェ ン ト レ コ ー ダ	記憶容量	1. CH. 1024または2048ワード 2. CH. 1024×2	
	分解能	8ビット	
	入力CH数	1または2	
	レンジ	.5V, 1V, 2V, 3V, 5V	
	書込み速度 読出し速度	内部クロック 1 μ sec ~ 500msec/ワード 18段切換 外部クロック 最高速度 1 μ sec/ワード 以上連続	
コ ン ピ ュ ー タ	演算処理装置		
	基本語長	16ビット	
	基本演算方式	16ビット並列2進演算	
	アドレス範囲	最大32Kワード	
	主記憶装置		
	語長	16ビット+2パリティビット	
	増設単位	16Kワード(基板当り容量)	
	アクセスタイム	380ms(磁気コア), 400ms(半導体)	
	命令実行速度(半導体メモリ使用時)		
	転送命令(16ビット)	RR: 2.1 μ s, RM: 2.6 μ s, MM: 3.2 μ s	
	固定小数点演算(16ビット)		
		加/減算	RR: 2.1 μ s, RM: 2.6 μ s, MM: 3.2 μ s
		乗算	RR: 12.3 μ s, RM: 12.7 μ s
		除算	RR: 14.4 μ s, RM: 15.0 μ s
	磁気ディスク		
	記憶容量	10Mバイト	
	データ転送速度	312.5Kバイト/sec	
平均アクセスタイム	47.5msec		

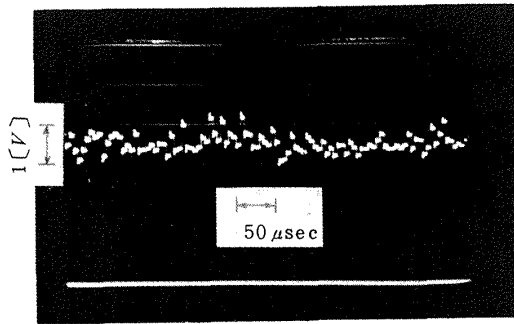


図24 速度信号抽出方法によるデータサンプリング

則なステップ状となる。図23は②の結果を示す。これは粒子間の時間間隔がすべて排斥されているが、1個の粒子で多数回出力されたものや1回程度しか出力されないものが入り乱れている。図24は③の結果を示す。個々の信号がバラバラになり、抽出されている様子が前記2例と比較して明瞭である。

4.3 効果

速度信号抽出方法において次の効果が挙げられる。

- 1) 1粒子当たり1個の独立した速度信号を得ることができる。これは、粒子の散乱光強度の不揃いや、周波数シフタの使用によってバースト信号中の波数が粒子毎に著しく異った場合に極めて有効となる。

2) トラッカーの出力における周波数応答の遅れを除去し確実に立上った速度信号を取りこむことができる。

3) 出力が高速かつランダムであっても、本方法を用いれば低速の外部サンプリング方式によるA/Dコンバータを使用でき、コスト的にも有利である。

4) トラッカーの出力に対し、サンプラーの計数回路が、さらに信号有効化の役割を果し、極端なノイズ信号を除去する。

5) トラッカーレンジのフルスケールに近づいた場合およびバースト信号中の波数が少ない条件下では速度信号を抽出しにくくなる。

5. データ処理方法

本項では、コンピュータによるデータ整理方法およびこれらのデータを用いた二次元流の解析方法などについてのべる。全体のフローチャートを図25に示す。

5.1 データファイルの作成

1計測点において数千個の微粒子によるデータが存在し、一日の計測点が数百点に及ぶような場合には、データ数は莫大な量に達する。しかもこうしたデータは解析のため一定期間保持する必要があり、従ってデータファイルの作成が不可欠で5メガワードのディスクを利用したファイル作成の作業を行なっている。データ取り込み及びファイル作成プログラムを付録BおよびCに示す。

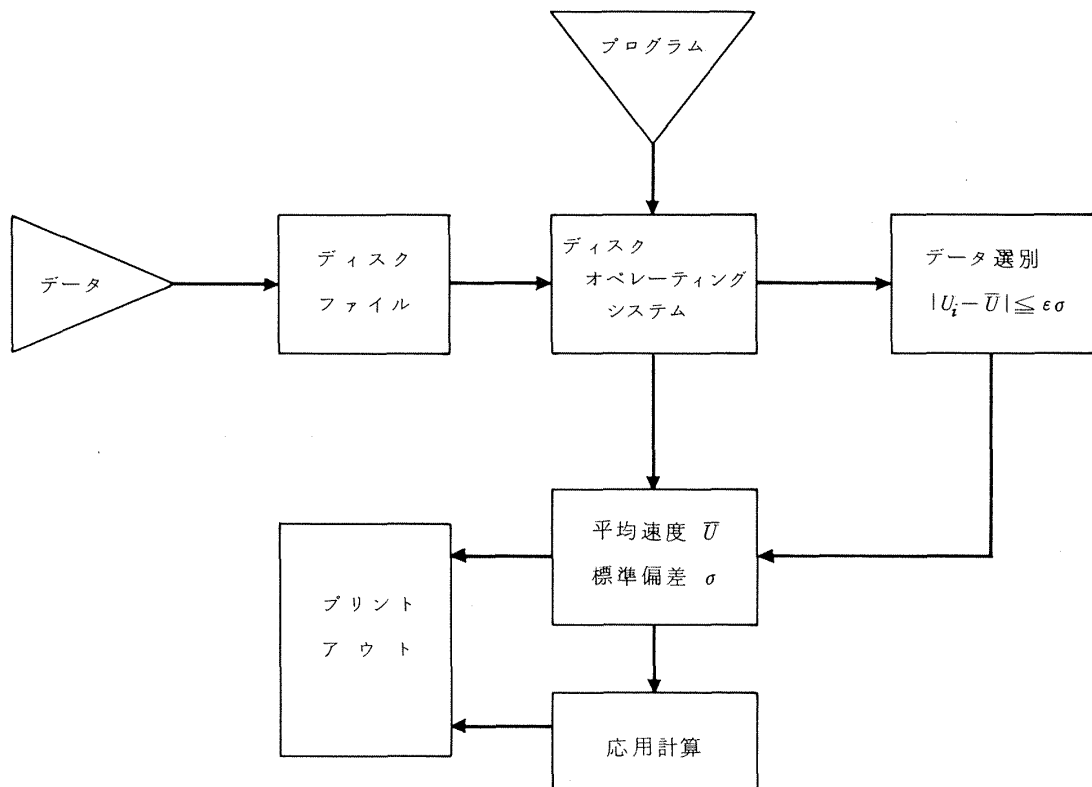


図25 フローチャート

5.2 解析

1) 平均速度, 乱流値

流れの乱れに対して, 粒子が極めて小さくこれに充分応答していれば, 一定時間内において取込まれるデータは互いに独立な量であると考えることができ, これらの度数分布(ヒストグラム)より, 算術平均値および標準偏差値を求めれば, それぞれ時間平均速度および時間変動分の実効値(乱流値)を求めることができる。

$$\bar{U} = \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{n} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\Delta U^2} = \left\{ \sum_{i=1}^n \frac{U_i^2}{n} - \bar{U}^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

2) 二次元流の解析

図26の如く $x-y$ 面においてレーザー光面を回転させそれぞれの速度成分を測定することによって二次元流の平均速度ベクトル及びレイノルズ応力を決定できる。回転面を回転角 45° ステップに(1), (2), (3)とし, U に対しそれぞれの速度成分を U_1, U_2, U_3 とすれば,

$$\bar{u} = \bar{U} \cos\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right) = \bar{U} / \sqrt{2} (\cos\beta + \sin\beta)$$

$$\bar{v} = \bar{U} \sin\left(\beta - \frac{\pi}{4}\right) = \bar{U} / \sqrt{2} (\sin\beta - \cos\beta)$$

ここで $\bar{U}_3 = \bar{U} \cos\beta, \bar{U}_2 = \bar{U} \sin\beta$ であるから

$$\cos\beta + \sin\beta = (\bar{U}_2 + \bar{U}_3) / \bar{U}$$

$$\sin\beta - \cos\beta = (\bar{U}_2 - \bar{U}_3) / \bar{U}$$

となりもとの式に代入し

$$\left. \begin{aligned} \bar{u} &= (\bar{U}_2 + \bar{U}_3) / \sqrt{2} \\ \bar{v} &= (\bar{U}_2 - \bar{U}_3) / \sqrt{2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

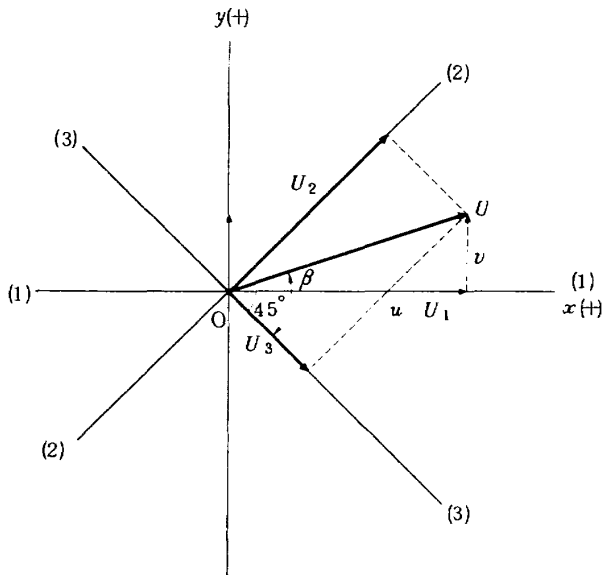


図26 二次元流れの測定

次に

$$U_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (u + v) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{u} + u' + \bar{v} + v')$$

$$U_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} (u - v) = \frac{1}{\sqrt{2}} (\bar{u} + u' - \bar{v} - v')$$

より

$$\Delta U_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (u' + v')$$

$$\Delta U_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} (u' - v')$$

$$\overline{\Delta U_2^2} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + 2\overline{u'v'} + \overline{v'^2})$$

$$\overline{\Delta U_3^2} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} - 2\overline{u'v'} + \overline{v'^2})$$

$$\overline{\Delta U_1^2} = \overline{u'^2}$$

上式より

$$\left. \begin{aligned} \overline{u'v'} &= (\overline{\Delta U_2^2} - \overline{\Delta U_3^2}) / 2 \\ \overline{u'^2} &= \overline{\Delta U_1^2} \\ \overline{v'^2} &= \overline{\Delta U_2^2} + \overline{\Delta U_3^2} - \overline{\Delta U_1^2} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

として得られる。これらのプログラム例を付録Dに示す。

6. 測定精度

6.1 不良データ

正確な処理システムを用いても, なおかつ現実にはたとえば流れに追従しない粒子による情報又はデータサンプリング中に光学的, 電気的な何らかの原因で, 不確実なデータが多少混入することは避けられず, 測定精度上影響をもつ, そこで統計処理上で何らかの基準を設定し, 取りこんだ全てのデータの判定を行ない, 不確実と考えられる信号を作為的に排除する必要がある。しかし基準の設定は極めて重要な意味をもち, 安易に決定することは許されない。Roseら⁷⁾は 3σ テストを行ない, 筆者らもこの方法を採用した。

$$|U_i - \bar{U}| \leq \epsilon \cdot \sigma \quad (9)$$

において, ϵ を予め定め, この選別作業を σ が収束するまで実行する。 σ の大きさによっても異なるが $3 \sim 4$ 回程度で σ は収束する。 ϵ をどのような値が適切であるかについての検討は測定例に関して後述する (§ 7.3)。

さらに Durstら⁸⁾が導入している Skewness factor および Flatness factor についても調べた。

$$S_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^3 / \left(\sum_{i=1}^n \frac{U_i^2}{n} - \bar{U}^2 \right)^{3/2} \quad (10)$$

$$F_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^4 / \left(\sum_{i=1}^n \frac{U_i^2}{n} - \bar{U}^2 \right)^2$$

(11)

上記のファクターはそれぞれデータ分布の歪度および尖度を示すもので、正規分布の場合は $S_f = 0$ 、 $F_f = 3.0$ である。したがって不良データ排除の点でこれらの値に対する考察も有効である (§ 7.3)。

6.2 データサンプリング数

1 測定点におけるデータサンプリング数ほどの程度が適切かという問題に関しても定説はない。Baker⁹⁾は統計的誤差論から1000個のサンプリングの場合については $\sqrt{\bar{u}^2}$ については7%、 \bar{u} に関しては最大速度で1%の誤差が生ずるとした。Owen¹⁰⁾は5%の統計上の誤差をもって2000個としている。筆者らは1000~10000個の間で検討を行なった (§ 7.3)。

6.3 機器の精度

1) トラッカー

a) ダイナミックレンジ内の直線性

入力周波数(発振器による連続波)に対する直線性を図27に示す。レンジの下限付近では若干不安定となるが、フルスケールの±0.2%内には入っており、大旨良好である。

ある。

b) キャプチャ巾内の直線性

M.F.レンジに関する特性を図28に示す。全体的にやや低めに出ており、特に高い方では誤差が増加する。乱流測定においてはできるだけキャプチャ巾を狭めた範囲内で測定する必要がある。

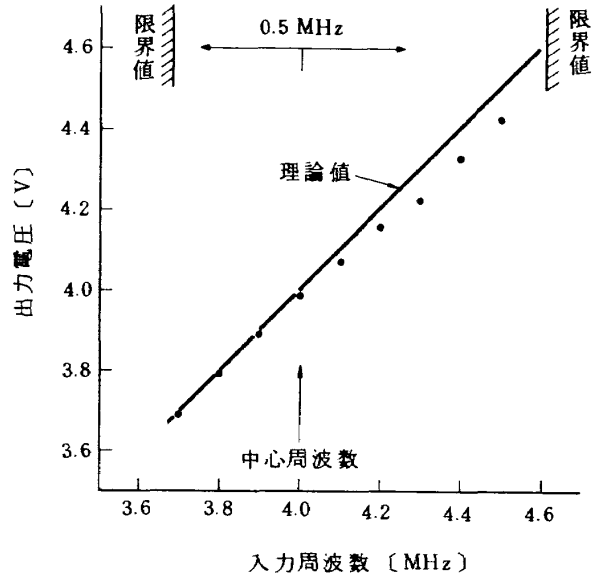


図28 キャプチャ巾内の出力特性 (M.F.レンジ)

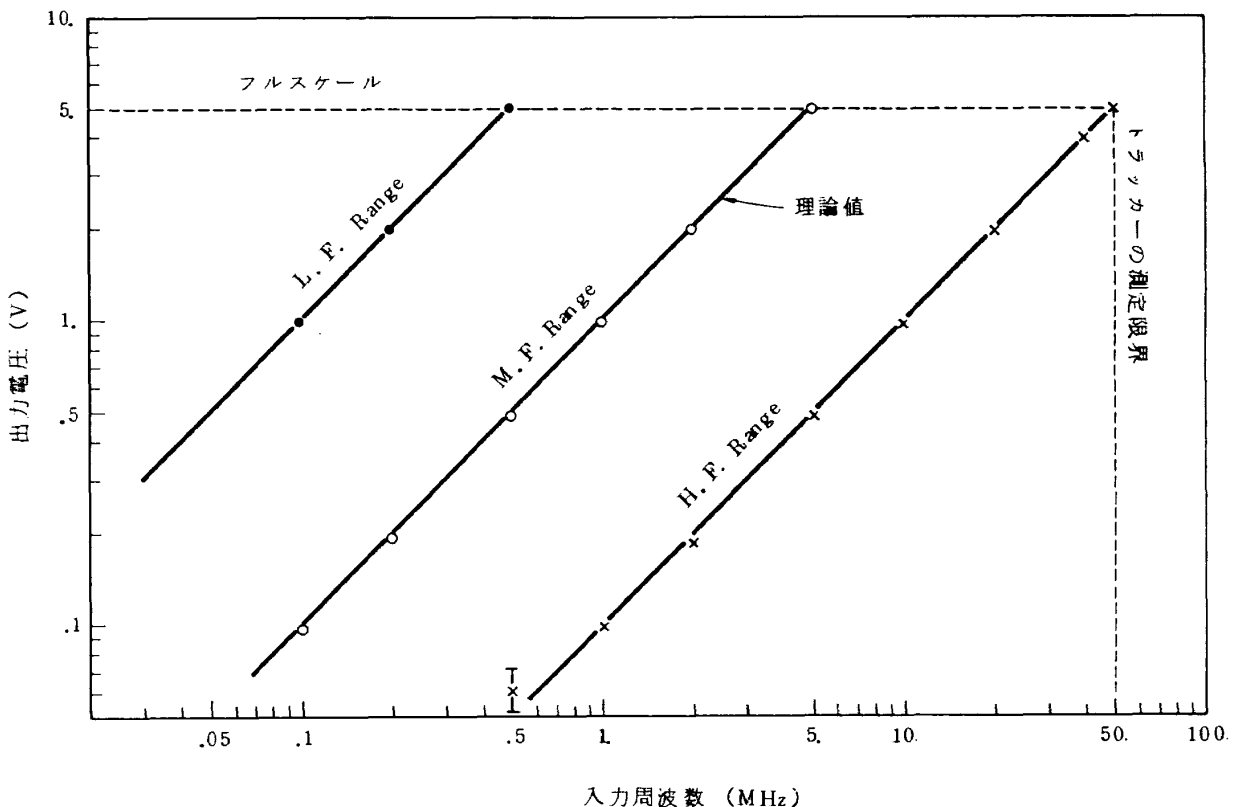


図27 トラッカーの出力特性 (ダイナミックレンジ内の直線性)

2) トランジェントレコーダ

デジタルメモリーは8ビット/ワードであり、精度はフルスケールに対して0.8%である。入力電圧に対する出力電圧の直線性を図29に示す。大旨良好である。

3) サンプリングボリューム

空間的分解能が問題となるが、サンプリングボリュームはビームがレンズによって収束されるので、 w_m, h_m, l_m で示せば図30(b)の形状になる。しかしビームの強度がガウス分布を有しているため等強度面で囲まれる最も大きい立体は図31に示すような楕円体となり、その形状は次式によって示される。

$$w'_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{D_m}{\cos(\theta/2)}$$

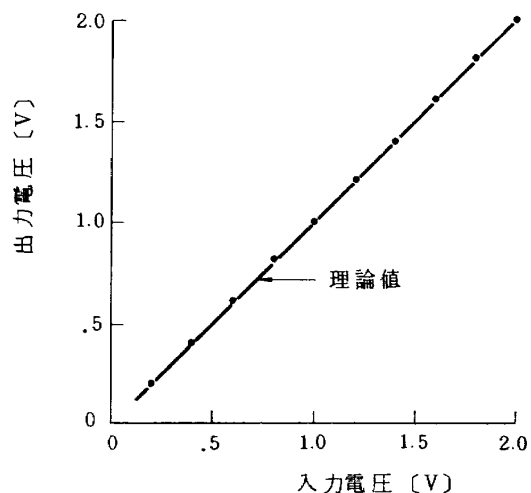


図29 トランジェントレコーダ出力の直線性(2Vレンジ)

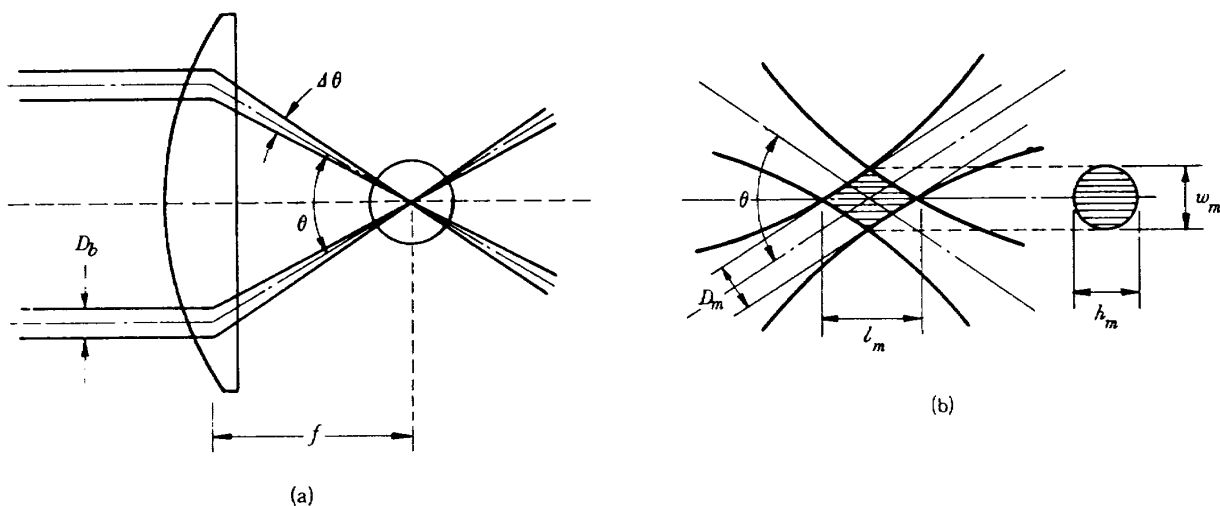


図30 レーザ光交叉部(a)とその拡大図(b)

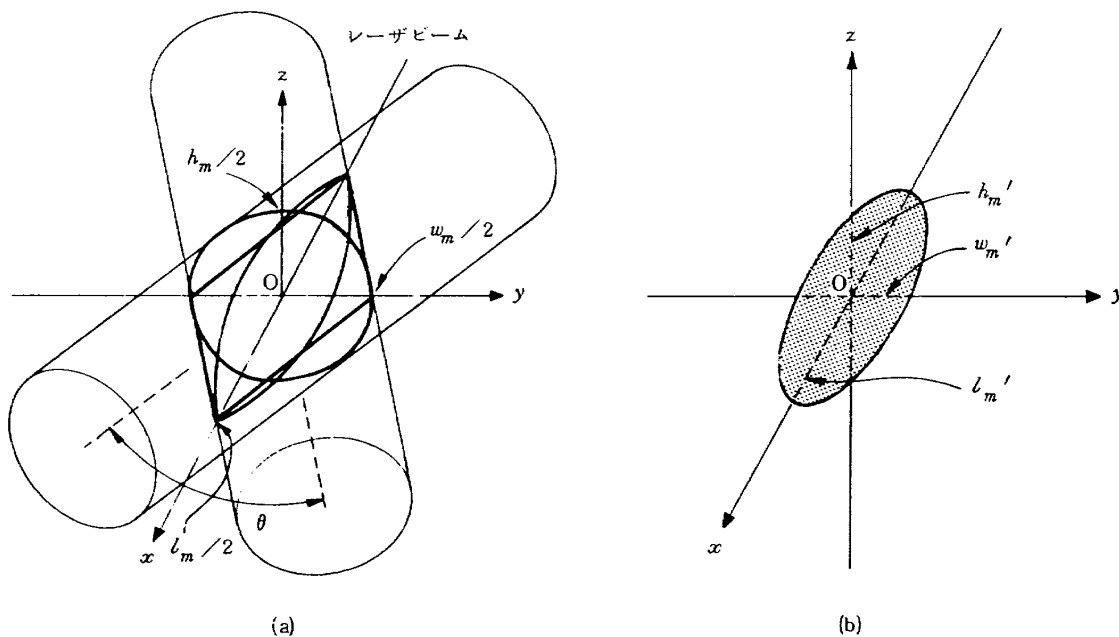


図31 レーザ光交叉部の形(a)と測定点の形(b)

$$h'_m = \frac{1}{\sqrt{2}} D_m$$

$$l'_m = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{D_m}{\sin(\theta/2)}$$

$$V_m = \frac{4}{3} \pi \cdot \frac{w'_m}{2} \cdot \frac{h'_m}{2} \cdot \frac{l'_m}{2}$$

$$= \frac{\pi}{6\sqrt{2}} \cdot \frac{D_m^3}{\sin \theta}$$

ただし

$$D_m = \frac{4 f_a \cdot \lambda}{\pi D_b}$$

f_a : レンズの焦点距離

D_b : ビーム径

V_m : 体積

本レーザー流速計に付属するレンズ3種について計算した値を表3に示す。 w'_m , h'_m は大差なく、いずれも空間的分解能は高いが l'_m は θ によって著しく異なり、 θ が小さいほど空間的分解能は悪くなり、 x 方向の速度勾配が大きい場合にはバイアス値を生ずることを考慮しなければならない。

表3 サンプリングボリュームの大きさ(ビーム径1mmφ)

レンズNo.	1	2	3
θ (°)	25.5	11.68	4.9
f_a (mm)	104.0	241.9	583.0
w'_m (mm)	6.1×10^{-2}	1.39×10^{-1}	3.32×10^{-1}
h'_m (mm)	5.9×10^{-2}	1.38×10^{-1}	3.31×10^{-1}
l'_m (mm)	2.68×10^{-1}	1.356	7.746
V_m (mm ³)	5.1×10^{-4}	1.36×10^{-2}	4.46×10^{-1}

4) 粒子の流れへの応答性

粒子の流れへの応答性は、極めて重要な問題である。一般には数 μm 程度の粒径を有していればよいとされているが、小さすぎる場合はブラウン運動の影響が無視できなくなり、大きすぎると高速の場合のスリップ現象または乱流の場合は乱流のマイクロスケールより小さくしなければならない等問題があり、レーザー流速計への散乱粒子に関して体系的研究を行なった Melling¹²⁾によれば、 $0.2 \mu\text{m} \sim 0.8 \mu\text{m}$ が適切と結論している。しかし現実的には流れへの混入方法によって生ずる問題、例えば金属元素であれば、噴霧させた場合には帯電し流れと異なる運動をしたり、液体粒子であれば付着しあってしまうな

どの問題があり、厳密な意味での理想粒子を混入させることは極めてむずかしい。そこで現実的には、レーザー能力、信号処理方法の特質、実験条件等を勘案し、独自の判定基準を設けて応答性を考えている。Roseら⁷⁾は自然浮遊粒子(naturally occurring particles)の使用に当って、スモークとの値が同じとなるからと判定している。

筆者らは酸化チタン(TiO_2 , 粒径 $0.2 \sim 0.35 \mu\text{m}$)およびスモーク(平均で $1 \mu\text{m}$ 以下)を使用した。特に TiO_2 は燃焼時に使用できる点から重視した。

7. 応用例 - 熱線風速計との比較 -

7.1 熱線

市販の定温度型熱線風速計(リニアライザ付)を使用した。熱線についてはすでに報告¹²⁾があるので詳細は省略する。熱線プローブは $5 \mu\text{m}\phi$ のタングステンを使用し(図32)、常温時に対する抵抗比は1.5(熱線温度約 200°C)で使用した。噴流(図33)におけるピトー管との比較を図34に示す。ほぼリニアティは満足している。 \bar{U} メータおよび RMS(ΔU)計は1.5級を使用している。

7.2 噴流の測定

図33に示すノズル噴流を、同位置で $\bar{u}_0 = 12.18 \text{ m/s}$ の条件のもとに測定した。レーザー流速計の測定条件を表4に示す。結果について図35(a)に平均速度 \bar{u} / \bar{u}_0 の分布を(b)に $\sqrt{u'^2} / \bar{u}_0$ の分布を熱線との比較で示した図36に $\epsilon = 3.0$ における S_f および F_f の分布を示す。平均流速および乱流速度に対する結果は両端で合いくくなり、LDVの結果が高めにでる。これは次のような原

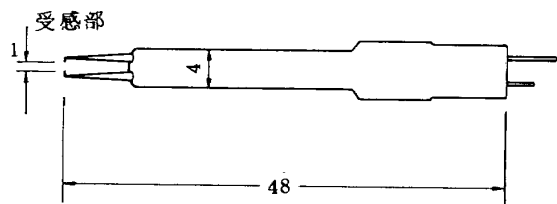


図32 熱線プローブ

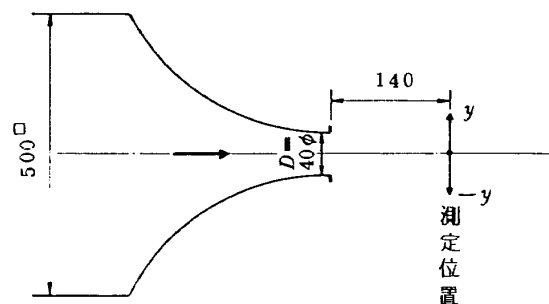


図33 噴流測定位置

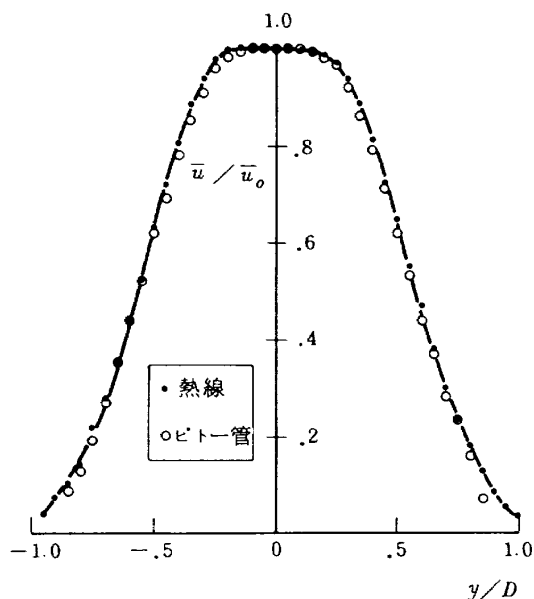
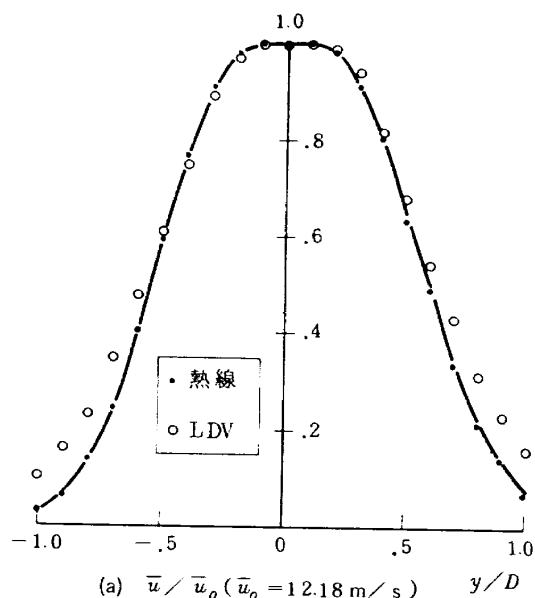
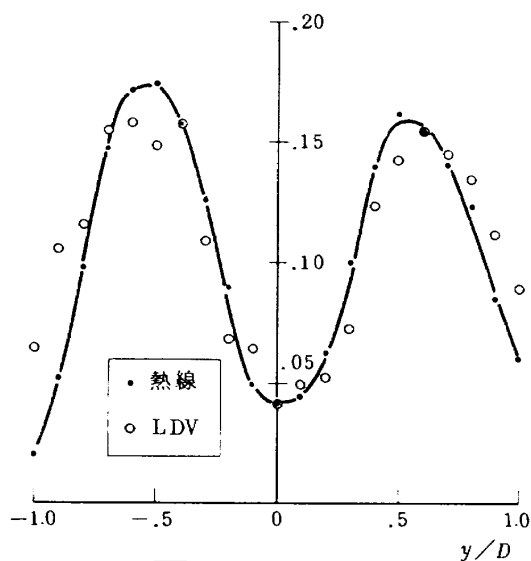


図34 熱線とピトー管との比較 ($\bar{u}_0 = 26.32 \text{ m/s}$)



(a) \bar{u} / \bar{u}_0 ($\bar{u}_0 = 12.18 \text{ m/s}$)



(b) $\sqrt{u'^2} / \bar{u}_0$ ($\bar{u}_0 = 12.18 \text{ m/s}$)

図35 レーザ流速計と熱線との比較

表4 レーザ流速計測定条件

ビーム交叉角	$\theta = 11.68^\circ$
散乱粒子	スモーク
シフト周波数	5 MHz
トラッカー	H.F. レンジ
トランジェントレコーダ	フルスケール 1 V レンジ
1測定点当りのデータサンプリング数	1024
データ判別基準	$\epsilon = 3.0$

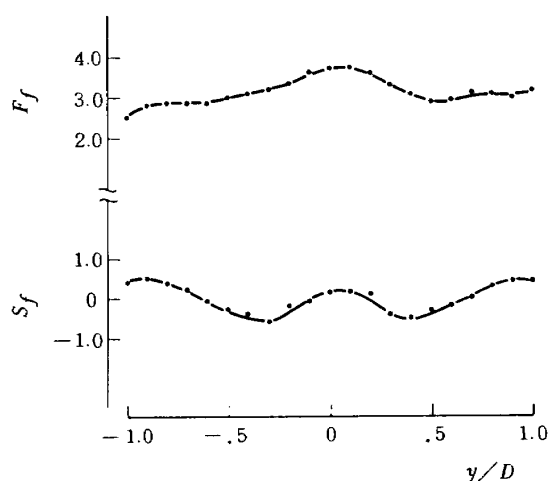


図36 $\epsilon = 3.0$ における Skewness Factor (S_f) および Flatness Factor (F_f) の分布

因が考えられる。1) 噴流に微粒子を混入させているため、拡散して行く過程で、周囲のシーディングされていない空気とのミキシングが行なわれ粒子濃度が全体として下ると共に濃度分布が一様でなくなる。かつこの付近は流体的にも大きなスケールの渦成分が存在しており、いわゆる速度バイアス誤差が増大する。すなわち速度の大きい瞬間と小さい瞬間とで粒子数が異なるが、これらを同格で扱って統計処理すると速度の大きい方へ偏った結果を出す。このことは Self & Whitelaw¹⁴⁾ によっても指摘されている。2) 噴流が三次元的に拡散し、外気からエントレインメントによる影響なども加わり、熱線の測定値が厳密にコンポーネントを測定していない点も指摘される。

7.3 考察

1) ϵ について

乱流に関しては $\epsilon = 2.0$ の場合が熱線から著しく離れる (図37) が、 $\epsilon = 3.0$ 以上の場合は比較的接近している。しかし S_f , F_f でみると Total (排除しない全デー

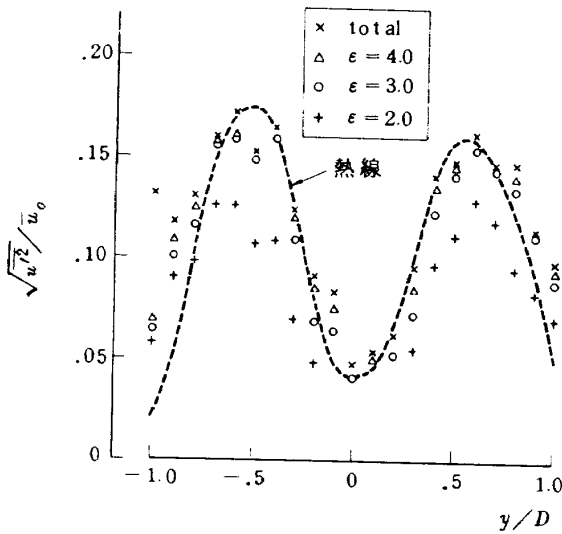


図37 $\sqrt{u'^2}/\bar{u}_0$ に対する ϵ の影響

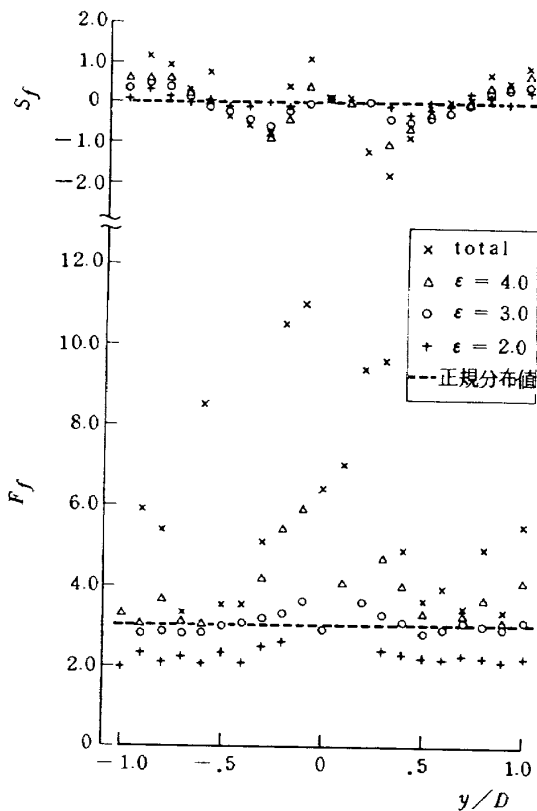


図38 F_f および S_f に対する ϵ の影響

タ数) の場合は、正規分布から著しく離反する(図38)。特に $y/D=0$ 付近で著しい。このことは σ の値が小さいところでは不良データの影響が比較的大きいことを示す。同時に除去しやすいことも示している。しかし σ が大きい場合には不良データの見分けが困難で、しかも除去が難しい。本実験結果から $\epsilon=3.0$ を採用すると $\sqrt{u'^2}/\bar{u}_0$ が比較的熱線に近く、 S_f および F_f もほぼ正規分

布に近く、この範囲ではもっとも理想的である。しかし図36のように S_f および F_f も乱れの性質に対して、法則性を有しているので、 ϵ に対しては、さらに詳しい系統的研究が必要であろう。

2) データサンプリング数について

乱流強度 ($\sqrt{u'^2}/\bar{u}$) が 25% 程度の点で、1 測定点におけるデータサンプリング数を 1 K (1024) ~ 10 K まで増やした場合の結果について調べた(図39)。7 K 程度でほぼ収束し最終値に対する最大変動値の割合は、 \bar{u} で 1.8%、 $\sqrt{u'^2}$ で 3.4% である。したがって 1% 程度の精度範囲内での測定をするためには 3 K 程度のデータサンプリング数が必要であると考えられる。

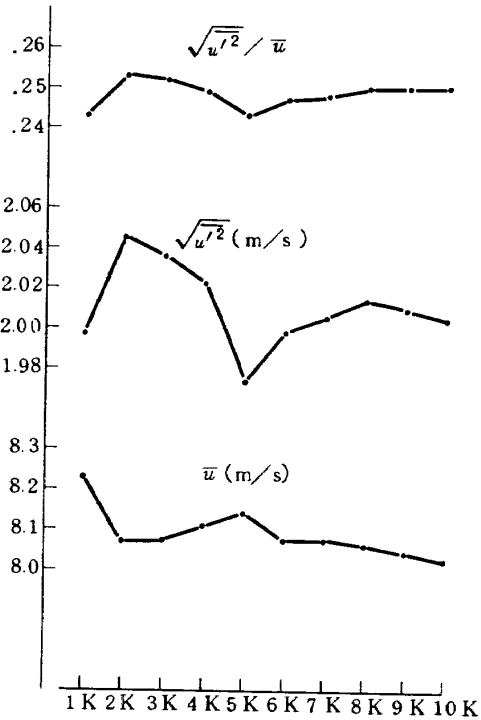


図39 データサンプリング数による計測値の変化 ($\epsilon=3.0$)

8. 結 論

本研究によって次のような結論が得られた。

- 1) 新たに開発した速度信号抽出機構を加えたコンピュータとのオンラインによるデータ処理方法を確立し、レーザ流速計の応用範囲を測定条件、測定時間、処理時間、応用解析などにわたって著しく拡大できた。
- 2) 速度信号抽出機構によって、周波数シフト装置の導入、高乱流、低粒子濃度などの測定において著しく精度の向上したデータサンプリングが可能となった。
- 3) 熱線との比較により、本データ処理方法の確認を

行ない、その有効性が確認された。しかし測定精度の向上について、今後一層の研究が必要である。

本データ処理方法の確立によって今後レーザー流速計の利用範囲も急速に拡大するものと思われるが、いぜんとしてレーザー流速計の使用に関しては、光学系、電気系、散乱粒子および実験条件等に関し、経験の蓄積がもっとも重要な要素である。

最後に本研究を進めるに当たり、日本科学工業(株)の広永勝治氏を始めとする多くの方に大変御支援をいただいた。原動機部江口邦久技官には実験に協力していただいた。また付録Aの周波数シフト原理の計算は早稲田大学院萩原明房君に負うところ大である。最後に、本研究を遂行するに当たり終始激励と理解を示された鳥崎忠雄総合研究官、松木正勝原動機部長に感謝します。

参 考 文 献

- 1) Y. Yeh and H. Z. Cummins; Appl. Phys. Lett. 4, p. 176 (1964).
- 2) 三品博達, 朝倉利光; 「光ヘテロダイソ検出法の計測への応用」ードブラー速度計を中心に, 応用物理第42巻第6号(1973年), p 560.
- 3) 中谷登, 山田朝治; 「レーザーを用いた流速測定」, システムと制御, Vol. 18, 1974, p 453.
- 4) 小橋安次郎; 「レーザーによる流速の測定」, 日本機械学会誌, 第77巻, 第664号, 昭和49年3月.
- 5) 浅沼強, 小保方富夫; 「レーザー流速計によるシリンダ内流速の測定」, 日本機械学会第426回講習会教材('76-3-15, 16, 東京, 内燃機関の新しい計測法).
- 6) 池田, 他2名; 「ジェット火災の乱れ分布」, 第14回燃焼シンポジウム(東京, 昭和51. 12. 6~7) 前刷集 p 120.
- 7) W. C. Rose and D. A. Johnson; Turbulence in a Shock-Wave Boundary-Layer Interaction, AIAA Journal, Vol. 13, No.7, pp. 884 ~ 889.
- 8) F. Durst, A. Melling and J. H. Whitelaw; The Application of Optical Anemometry to Measurement in Combustion Systems, Combustion and Flame 18, pp. 197 ~ 201 (1972).
- 9) R. J. Baker, P. Hutchinson and J. H. Whitelaw; Velocity Measurements in the Recirculation Region of an Industrial Burner Flame by Laser Anemometry with Light Frequency Shifting; Combustion and Flame 23, pp. 57 ~ 71 (1974).
- 10) F. K. Owen; Laser Velocimeter Measurements in Free and Confined Coaxial Jets with Recirculation, AIAA Paper 75 ~ 120, (AIAA 13th Aerospace Sciences Meeting, Pasadena, Calif./January 20 ~ 22, 1975).
- 11) A. Melling; Scattering Particles for Laser Anemometry in Air: Selection Criteria and Their Realization, Imperial College Mech. Eng. Rept., ET/TN/B/7.
- 12) 林良生, 中谷輝臣; 「熱線による3次元平均速度ベクトルとレイノルズ応力の測定」, 航技研報告 TR-242, 1971年7月.
- 13) 藤井昭一, 五味光男; 「レーザー・ドブラー流速計の応用」, 日本ガスタービン学会誌, Vol. 4, No. 16, March 1977.
- 14) S. A. Self and J. H. Whitelaw; Laser Anemometry for Combustion Research, Combustion Science and Technology, Vol.13, pp.171 ~ 197 (1976).

付録A 周波数シフトの原理と実測例

1. 周波数シフト法の原理

光と超音波を干渉させることによって光の周波数をシフトさせる。図A-1を参照して、まず発振器によって発生された超音波は、増幅器、トランスジューサを介してガラス内に伝達され、ガラス中を進みアコースティックアブソーバで吸収される。このようなところへレーザー光を入射させると直進光と周波数シフトされた回折光が得られる。これは Bragg Cell とも呼ばれている装置である。

さて、シフトされた光線(波長 λ')ともとの光線(波長 λ)を交叉させる(図A-2(a))。図(b)で表わされるように、波長の違いから形成されるフリンジは同波長の場合の mm' に対して α だけ傾いて生ずる。又交点 P を形成している波面 a, b は時間と共に移動しても常に mm' 上で交わることに注意して、 λ だけ進んだ時刻 $t_0 + \Delta t$ において考える。この時 P は P' まで移動する。波面 c, d の交点 P_1 についても同様に同時刻には m_1m_1' 上を P_1' へ移動している。そこで t_0 におけるフリンジは P, P_1 を結ぶ直線であり、 $t_0 + \Delta t$ では P', P_1' を結ぶ直線である。従ってフリンジは mm' に対して α の

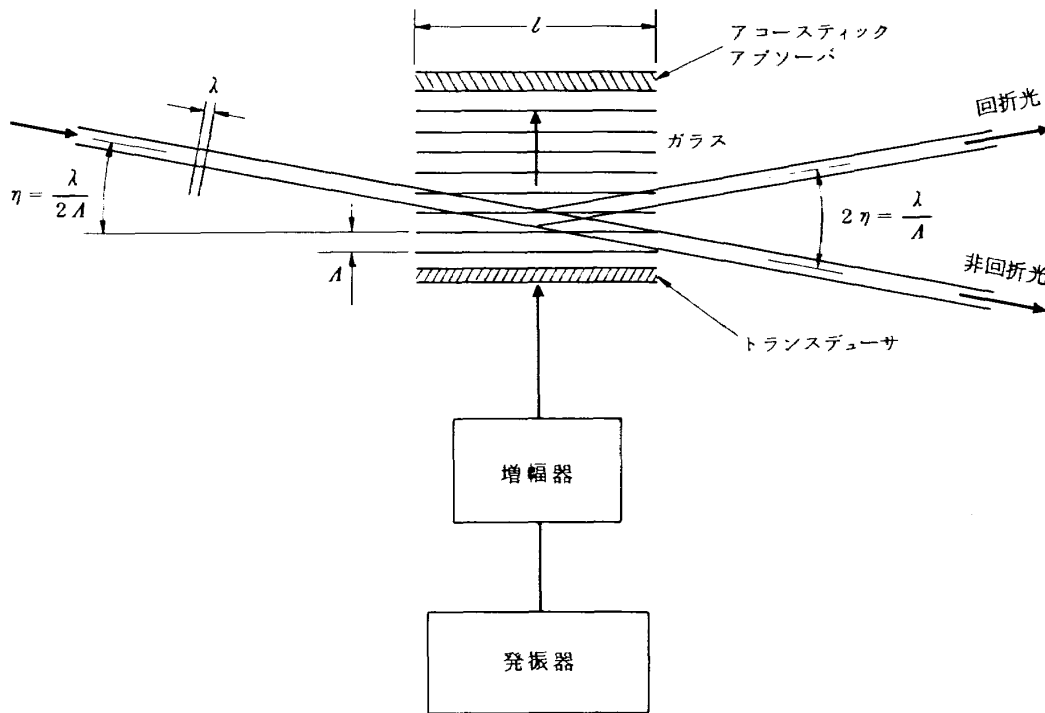
傾斜角をもちながら mm' 上を m' に向って移動することになる。この時 ll' 上でのフリンジの移動に着目すれば、 P 点は P'' 点に移動したように見える。 PP'' はフリンジの測定方向の移動距離である。

$$\begin{aligned} \tan \beta &= \frac{\lambda'}{(\lambda/\sin \theta) - (\lambda'/\sin \theta) \cdot \cos \theta} \\ &= \frac{\lambda' \sin \theta}{\lambda - \lambda' \cos \theta} \end{aligned} \tag{A-1}$$

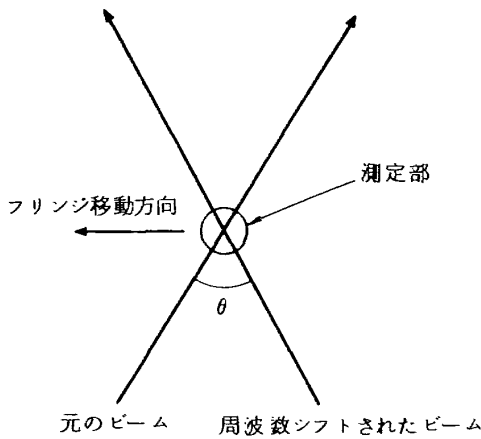
$$\begin{aligned} \tan(\alpha + \beta) &= \frac{\lambda'}{(\lambda'/\sin \theta) - (\lambda'/\sin \theta) \cdot \cos \theta} \\ &= \frac{\lambda' \sin \theta}{\lambda' - \lambda' \cos \theta} \end{aligned} \tag{A-2}$$

(A-1), (A-2)式より

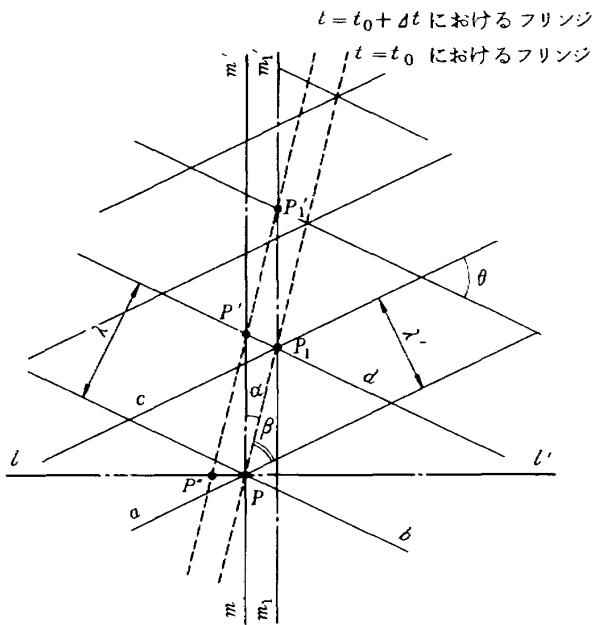
$$\begin{aligned} \tan \alpha &= \tan \{(\alpha + \beta) - \beta\} \\ &= \frac{\tan(\alpha + \beta) - \tan \beta}{1 + \tan(\alpha + \beta) \cdot \tan \beta} \\ &= \frac{\lambda' \sin \theta (\lambda - \lambda' \cos \theta - \lambda' + \lambda' \cos \theta)}{(\lambda - \lambda' \cos \theta)(\lambda' - \lambda' \cos \theta) + \lambda'^2 \sin^2 \theta} \\ &= \frac{\sin \theta \cdot (\lambda - \lambda')}{\lambda' - \lambda' \cos \theta - \lambda \cos \theta + \lambda} \end{aligned}$$



図A-1 周波数シフトの原理



(a) 測定部概略図



(b) 測定部詳細図

図A-2 周波数シフト効果

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\sin \theta \cdot (\lambda - \lambda')}{(\lambda' + \lambda)(1 - \cos \theta)} \\
 &\doteq \frac{\Delta \lambda \cdot \sin \theta}{2 \lambda (1 - \cos \theta)} \quad (A-3) \\
 &\text{ただし } \lambda = \lambda' + \Delta \lambda \\
 &\quad \lambda \gg \Delta \lambda
 \end{aligned}$$

ここで $\overline{PP''}$ は

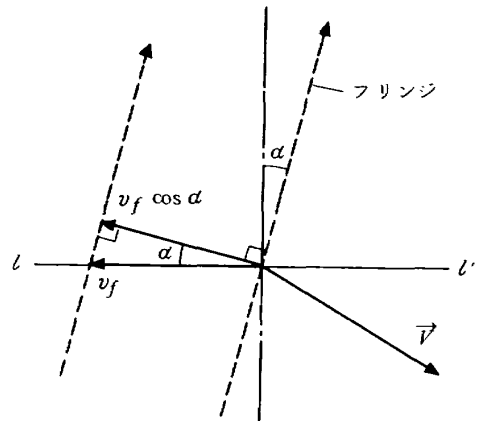
$$\begin{aligned}
 \overline{PP''} &= \tan \alpha \cdot \frac{\lambda}{\cos(\theta/2)} \\
 &= \frac{\Delta \lambda}{2 \lambda} \cdot \frac{\sin \theta}{(1 - \cos \theta)} \cdot \frac{\lambda}{\cos(\theta/2)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{\Delta \lambda}{2} \cdot \frac{2 \sin(\theta/2) \cos(\theta/2)}{\{1 - (1 - 2 \sin^2(\theta/2))\} \cdot \cos(\theta/2)} \\
 &= \frac{\Delta \lambda}{2 \sin(\theta/2)} \quad (A-4)
 \end{aligned}$$

光が λ だけ進むには $\Delta t = \lambda/c$ (c : 光速) だけ時間がかかるからフリンジの移動速度 v_f は

$$\begin{aligned}
 v_f &= \frac{\overline{PP''}}{\Delta t} = \frac{\Delta \lambda}{2 \sin(\theta/2)} \cdot \frac{c}{\lambda} \\
 &\doteq \frac{f_s}{f} \cdot c \cdot \frac{1}{2 \sin(\theta/2)} \\
 &= \frac{\lambda \cdot f_s}{2 \sin(\theta/2)} \quad (A-5)
 \end{aligned}$$

次に速度ベクトル \vec{v} をもつ粒子について考える(図A-3)。フリンジはフリンジ面に垂直な方向に $v_f \cos \alpha$ で移動する。更に検出される相対速度は \vec{v} および $v_f \cos \alpha$ の ll' 方向成分の和である。従って $v_f \cos \alpha$ の



図A-3 フリンジの移動と速度ベクトルとの関係

ll' 方向成分 v_f' は

$$v_f' = v_f \cos \alpha \cdot \cos \alpha = v_f \cos^2 \alpha \quad (A-6)$$

ここで

$$\begin{aligned}
 \tan^2 \alpha &= \frac{1 - \cos(\alpha/2)}{1 + \cos(\alpha/2)} \\
 \cos(\alpha/2) &= \frac{1 - \tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} \\
 \cos \alpha &= 2 \cdot \cos^2(\alpha/2) - 1 \\
 &= 2 \cdot \left[\frac{1 - \tan^2 \alpha}{1 + \tan^2 \alpha} \right]^2 - 1
 \end{aligned}$$

(A-3) 式を代入すれば

$$\begin{aligned}
 \cos \alpha &= 2 \cdot \left[\frac{\Delta \lambda^2 \sin^2 \theta - (\lambda' + \lambda)^2 (1 - \cos \theta)^2}{\Delta \lambda^2 \sin^2 \theta + (\lambda' + \lambda)^2 (1 - \cos \theta)^2} \right]^2 - 1 \\
 &\quad \Delta \lambda^2 \ll \lambda^2 \text{ より} \\
 \cos \alpha &\doteq 2 - 1 = 1 \quad (A-7)
 \end{aligned}$$

(A-7)式より

$$v_f \cong v_f'$$

したがって全ての速度ベクトルに対して(A-5)式の v_f を用いることができる。このようにしてフリンジは v_f なる速度で移動する。そこで散乱粒子の速度を v とすれば相対速度 v_s は

$$v_s = v_f \pm v = d(f_s \pm f_v) \quad (A-8)$$

で示される。ただし d はフリンジの間隔を示す。即ち v と v_f が同方向ならば負、反対なら正で出力される。よって v_s を引けば v の値がその方向と共にわかる。

本レーザ流速計では、一方のビームに対し 40 MHz のシフトを行ない、フォトマルからの出力をダウンミキシングによってシフト周波数を変化させたと同じ結果になるような構造を有している。すなわち

$$f_D = f_B \pm f_v \quad (f_B = 40 \text{ MHz})$$

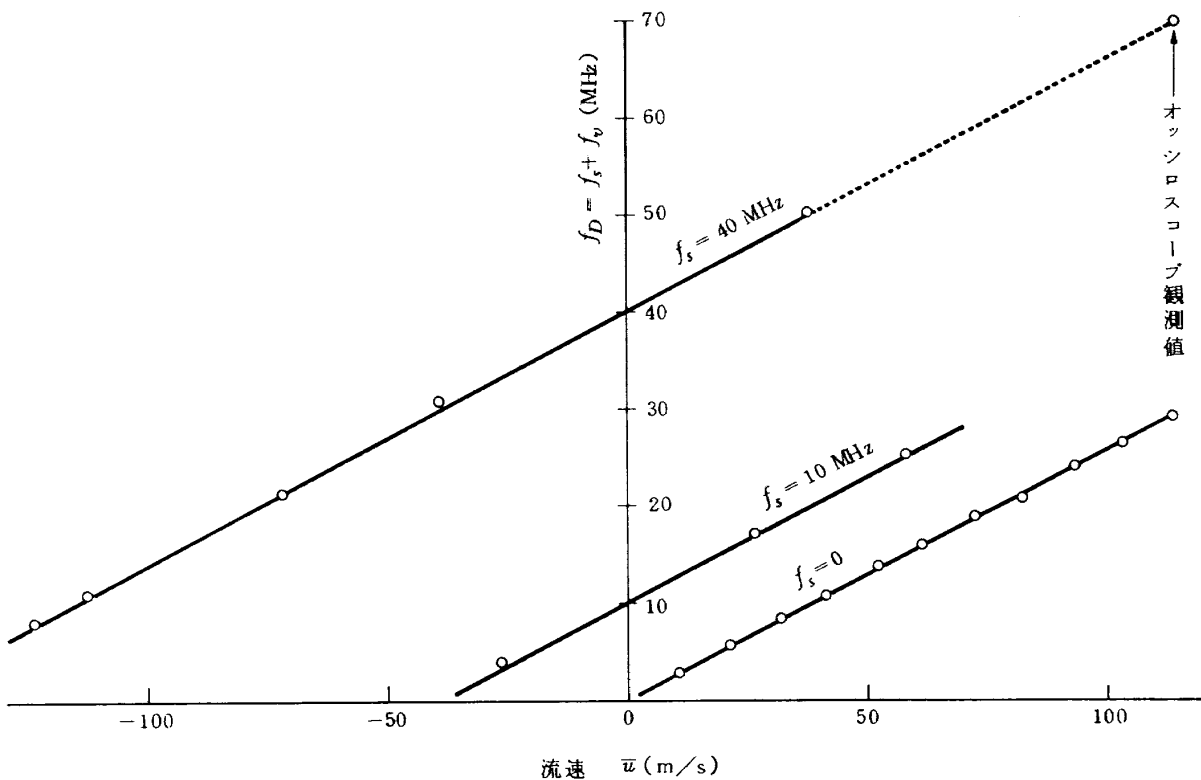
$$f_1 = f_B - f_s$$

$$f_D - f_1 = \pm f_v + f_s$$

f_1 を変化できるようにしておけば、 f_B は消去され、 f_s のみ変化したと同じ結果となる。これがトラッカへの入力となる。

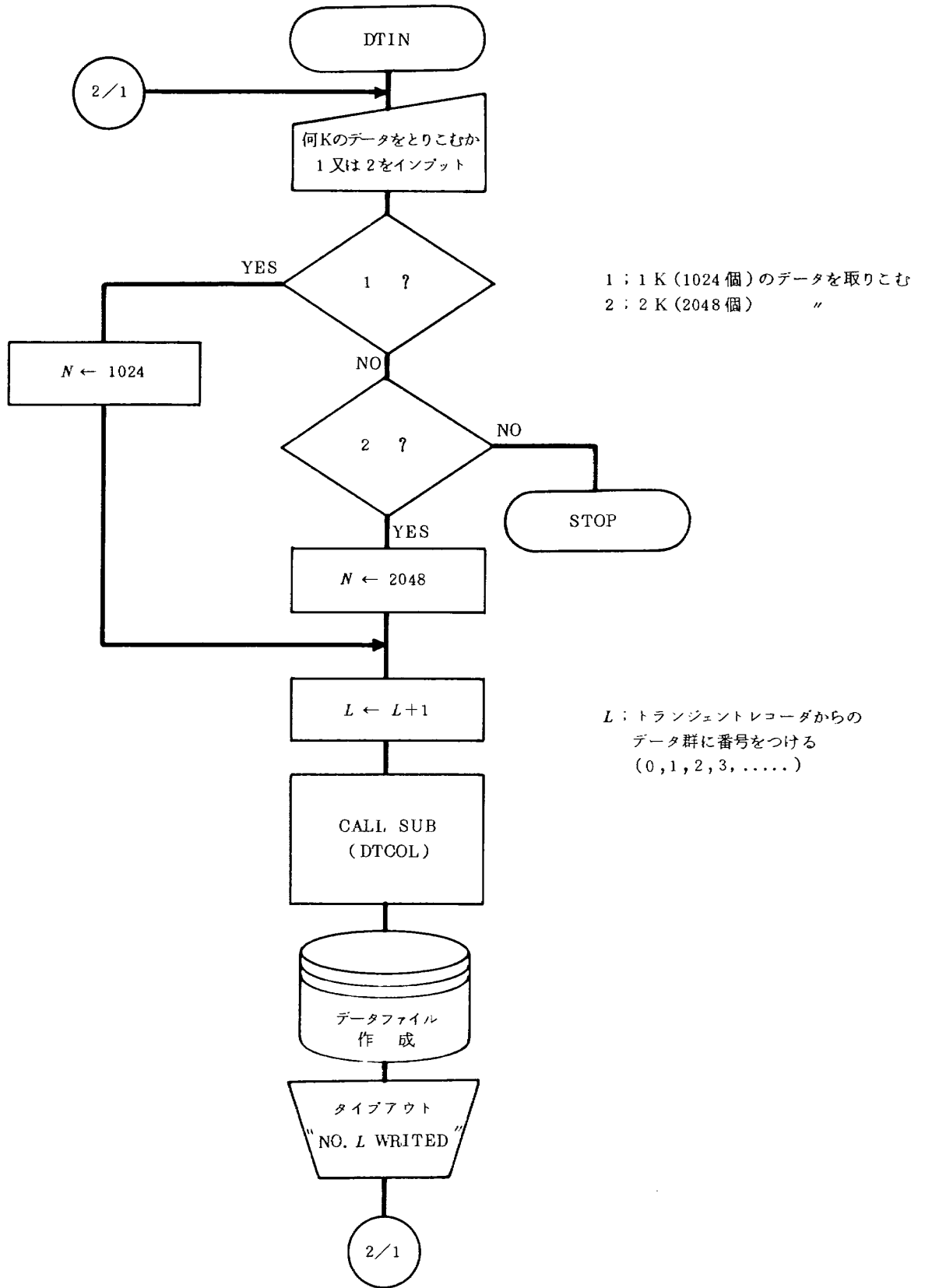
2. 周波数シフト有無による比較例

図21に示す吸込式風胴出口直後の流速を測定し、シフト有無による差異を図A-4に示す。ただし本測定では本報告でのべた処理システムは使用しておらず、トラッカーのデジタルメータの読み値から計算したものである。また負の速度は Bragg Cell の位置を 180° 回転し、フリンジの進む方向を変えて測定している。結果は周波数シフトによって負の速度を正確に測定できることを示している。



図A-4 周波数シフトの効果(測定例)

付録B-a データファイル作成プログラムフローチャート〔プログラム名 DTIN〕

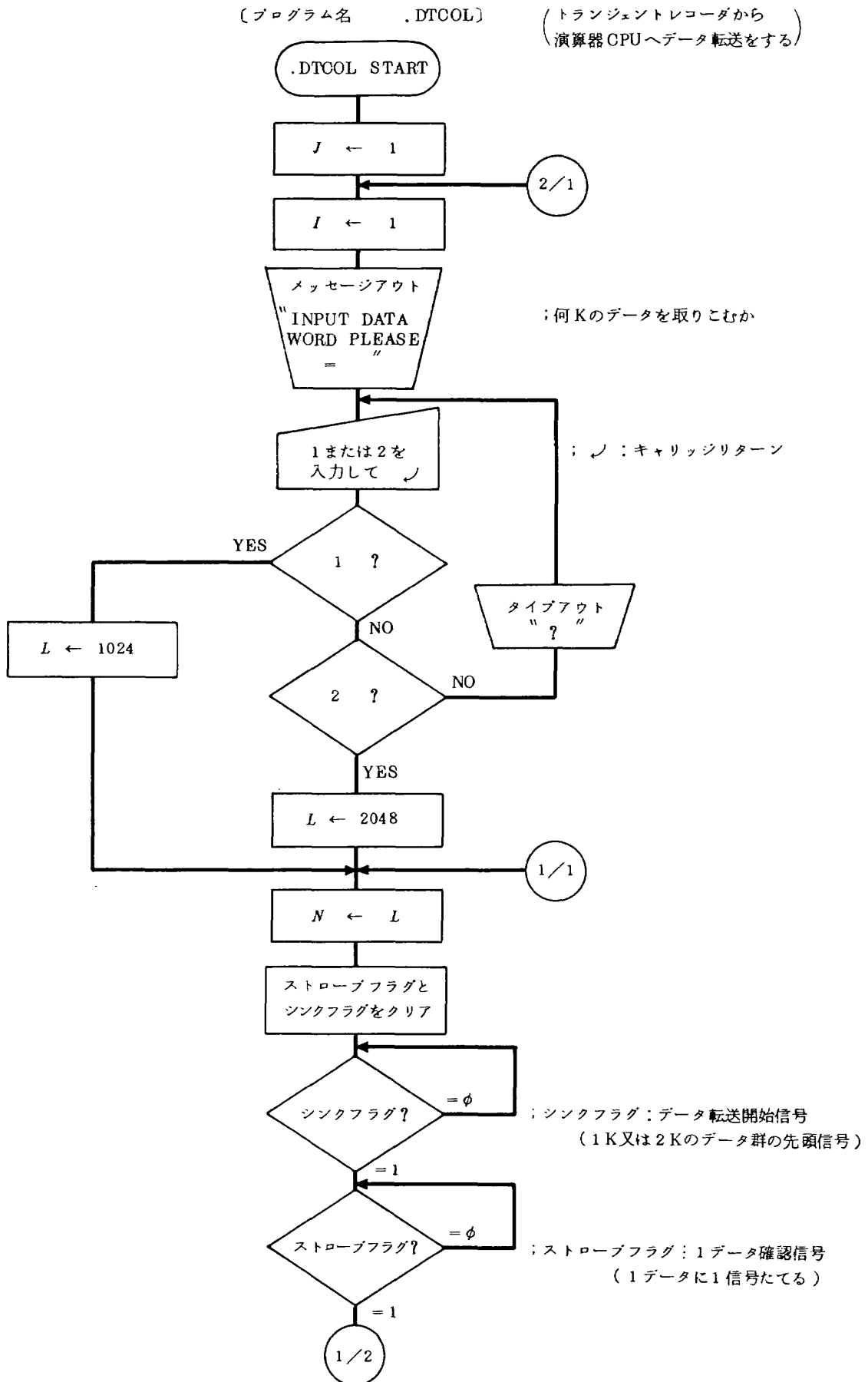


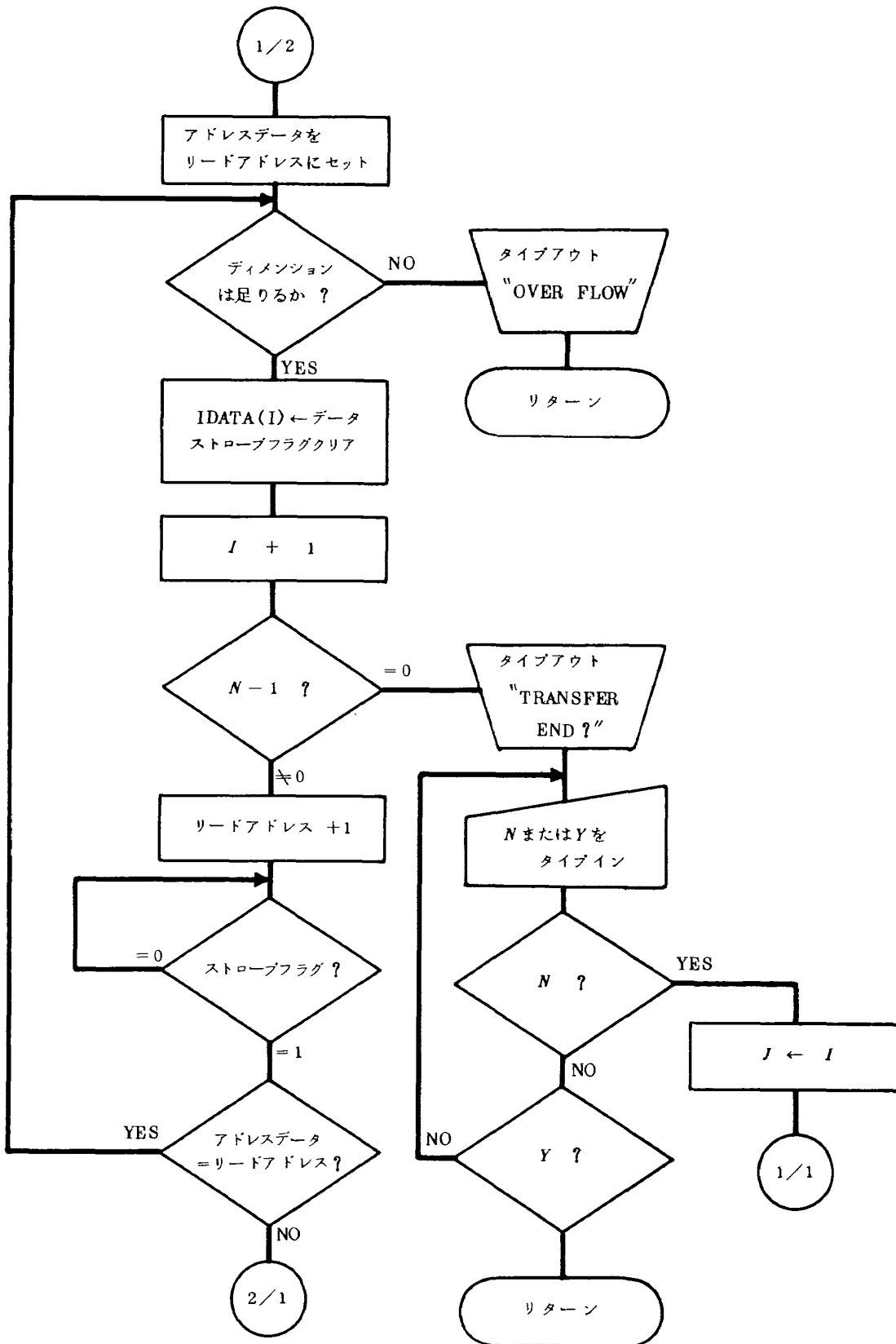
付録B - b データファイル作成プログラムリスト

```
DTIN / S

00001      PROGRAM DTIN
00002 C     DATA INPUT PROGRAM
00003 C     FROM ; TRANSIENT RECORDER
00004 C     TO   ; DISK MEMORY FILE
00005      DIMENSION IDATA(2048)
00006      L=0
00007      1 READ(5,100) N
00008      IF(N.EQ.1) GO TO 2
00009      IF(N.EQ.2) GO TO 2
00010      GO TO 3
00011      2 L=L+1
00012      N=1024*N
00013      CALL DTCOL(IDATA,N)
00014      WRITE(7) (IDATA(I), I=1,N)
00015      WRITE(4,101) L
00016      GO TO 1
00017      100 FORMAT(I4)
00018      101 FORMAT(3HNO., I3, 2X 6HWRTED)
00019      3 STOP
00020      END S
```

付録C - a データ取りこみサブルーチン詳細フローチャート





付録C - b データ取りこみサブルーチンプログラムリスト〔アセンブラ〕

DTCOL / S

```

00001 DATA COLLECTION PROGRAM
00002
00003 'LABEL DTCOL
00004 'ENT .DTCOL/
00005 'REL 0
00006
00007 ADHIN=#FE10
00008 ADLIN=#FE12
00009 CH1DT=#FE14
00010 CH2DT=#FE16
00011 SIKST=#FE18
00012 STRST=#FE1A
00013 STOUT=#FE1C
00014 DATABF=U6
00015
00016 >
00017 > ENTRY ROUTINE
00018 >
00019 .DTCOL, !(SC) ← U6 > PUSH REGISTERS
00020 !(SC) ← UF
00021 U6 ← (U7)†
00022 DTCLAST ← ((U7))†
00023 BUFADR ← (U7)†
00024 DTCLAST *2
00025 DTCLAST + BUFADR
00026 STOUT ← 0
00027 ONCEMR, SPI 2 > TYPE INITIAL MESSAGE
00028 3
00029 WCNTL
00030 MESSAGE
00031 MESALNG
00032 TYPIN, SPI 1 > READ COMMAND
00033 3
00034 PCNTL
00035 TTYBF
00036 TYBFLNG
00037 UF -1 > ONLY ONE CHARACTER?
00038 IF NO QUESOUT > IF NOT, TYPE OUT '?'
00039
00040 >
00041 > COMMAND PROCESSING ROUTINE
00042 >
00043 DATASU ← <400> > SET THE NUMBER OF DATA
00044 "TTYBF - <\1>? > IS IT '1'?
00045 IF 0 DTMOVE
00046 "TTYBF - <\2>? > IS IT '2'?
00047 IF NO QUESOUT > IF NOT, TYPE '?'
00048 DATASU *2 > IF SO, NO. OF DATA IS 2048
00049
00050 >
00051 > DATA TRANSFER ROUTINE
00052 >
00053 DTMOVE, COUNTER ← DATASU > SET COUNTER
00054 ERCNT ← <10>
00055 DATABF ← BUFADR > SET BUFFER POINTER
00056 STRST ← 0
00057 SIKST ← 0
00058 STOUT +1 > EXT STATUS OUT
00059 NOP
00060 NOP

```

DTCOL / 5

```

00061      NOP
00062      STOUT -0
00063      "SIKST?           > SYNC FLAG?
00064      IF + .-4
00065      "STRST?          > STROBE FLAG?
00066      IF + .-4
00067      ADDRDATA - ADHIN  > READ ADDRESS DATA
00068      SWAP ADDRDATA
00069      "ADDRDATA - ADLIN
00070      CHIDATA - CHIDT   > READ DATA
00071      STRST -0          > CLEAR STROBE FLAG
00072      CHIDATA + <#FF80> > CHANGE DATA INTO WORD MODE
00073      READADR - ADDRDATA > SET READ ADDRESS
00074      GOTO DTSTORE
00075  NEXTDT, "STRST?     > STROBE FLAG?
00076      IF + .-4
00077      ADDRDATA - ADHIN  > READ ADDRESS DATA
00078      SWAP ADDRDATA
00079      "ADDRDATA - ADLIN
00080      CHIDATA - CHIDT   > READ CHANNEL 1 DATA
00081      STRST -0          > CLEAR STROBE FLAG
00082      CHIDATA + <#FF80>
00083      ADDRDATA - READADR?
00084      IF 0 DTSTORE
00085      JUMP TRERROP
00086
00087  >
00088  > DATA STORE ROUTINE
00089  >
00090  DTSTORE, DATABF - DTCLAST? > BUFFER OVERFLOW?
00091      IF HS BFOVFL         > IF NOT, READ NEXT DATA
00092      (DATABF)' - CHIDATA > STORE DATA
00093      COUNTER -1           > DATA END?
00094      IF 0 ENDCHK          > IF SO, END CHECK ROUTINE
00095      READADR +1
00096      GOTO NEXTDT        > READ NEXT DATA
00097
00098  >
00099  > BUFFER OVERFLOW CONTROL ROUTINE
00100  >
00101  BFOVFL,  SPI 2         > PRINT MESSAGE
00102          3
00103          WCNTPL
00104          BFOFME
00105          OFMELNG
00106          JUMP STOP
00107
00108  >
00109  > PARAMETER ERROR CONTROL ROUTINE
00110  >
00111  QUESOUT, SPI 2         > TYPE '?'
00112          3
00113          WCNTPL
00114          QUEST
00115          C1
00116          GOTO TYPIN    > WAIT NEXT COMMAND
00117
00118  >
00119  > TRANSFER ERROR CONTROL ROUTINE
00120  >
00121  TREROUT, SPI 2        > TYPE OUT MESSAGE
00122          3
00123          WCNTPL

```



```

DTCOL / S

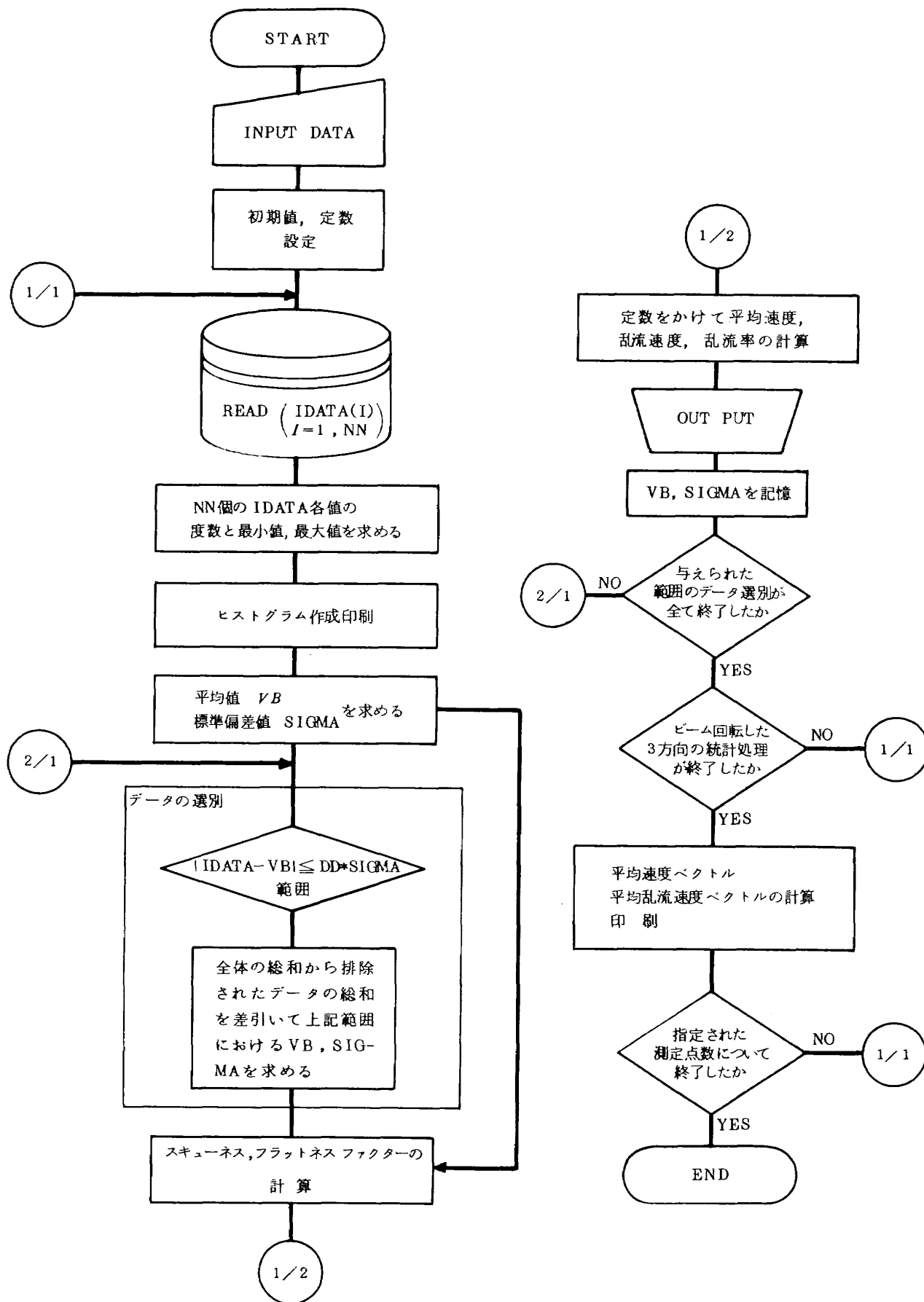
00124          TPERME
00125          TREPLNG
00126          GOTO ONCEMOR
00127
00128 >
00129 > END CHECK ROUTINE
00130 >
00131 ENDCHK,    SPI 2
00132          3
00133          WCNTL
00134          ECHKME
00135          ECKLNG
00136 LISTEN,   TKS - <I>          > READ 1 CHAPACTER (TTY)
00137          "TKS?
00138          IF + .-4
00139          "TKB - <\N>?        > IS IT 'N'?
00140          IF 0 AGAIN          > IF SO, TRANSFER AGAIN
00141          "TKB - <\Y>?        > IS IT 'Y'?
00142          IF NO LISTEN       > IF NOT, WAIT NEXT CHAPACTER
00143          "TKS - <40>
00144          SPI 2              > YES, TYPE 'Y'
00145          3
00146          WCNTL
00147          YES
00148          CI
00149
00150 >
00151 > RETURN CONTROL ROUTINE
00152 >
00153 RETCNTL,   UF - (SC)†        > POP REGISTERS
00154          U6 - (SC)†
00155          RETURN            > RETURN TO MASTER PROGRAM
00156
00157 >
00158 > TRANSFER AGAIN
00159 >
00160 AGAIN,   "TKS - <40>
00161          SPI 2              > TYPE 'N'
00162          3
00163          WCNTL
00164          NO
00165          CI
00166          BUFADR - DATABF    > SET NEXT BUFFER ADDRESS
00167          JUMP DTMOVE        > GO TO TRANSFER ROUTINE
00168
00169 >
00170 ADDRDATA, 0                  > ADDRESS DATA BUFFER
00171 BUFADR,   0
00172 CHIDATA, 0
00173 COUNTER,  0
00174 CI,      1
00175 DATASU,  0
00176 DTCLAST, 0                  > BUFFER LAST ADR
00177 RCNTL,   801                > TTY KEYBOARD (ECHO)
00178 READADR, 0                  > COMPARED WITH ADDRESS DATA
00179 WCNTPL,  2                  > TTY PRINTER
00180
00181 >
00182 > INITIAL MESSAGE
00183 >
00184 MESALNG,  1A
00185 MESSAGE,  'TEXT INPUT DATA WORD PLEASE = ●
00186 >

```

DTCOL / S

```
00187 > ERPOP MESSAGE
00188 >
00189 QUEST,    \?
00190 TRERLNG,  #F
00191 TRERME,    'TEXT TRANSFER EPROP!
00192 OFMELNG,  9
00193 BFOFME,    'TEXT OVERFLOW!
00194
00195 >
00196 > END CHECK MESSAGE
00197 >
00198 ECKLNG,    #D
00199 ECHKME,    'TEXT TRANSFER END?
00200 NO,        \N
00201 YES,       \Y
00202
00203 >
00204 > TTY READ BUFFER
00205 >
00206 TYBFLNG,   20
00207 TTYBF,     @20
00208 TREROR,    ERCNT -1
00209           IF 0 TREROUT
00210           JUMP DTMOVE
00211 ERCNT,     0
00212 STOP,      SPI 12
00213 0
00214
00215 'END      $
00216
00217
00218
00219
00220
```

付録D-a データ解析プログラム概略フローチャート〔プログラム名, CAL2〕



付録D-b データ解析プログラムリスト

```

PROGRAM CAL2
C 2-ZIGEN LDV DATA CAL.
DIMENSION IDATA(1024),IREN(127),LN(64),V(5,3),S(5,3)
DEFINE FILE 7(IREC)
WRITE(2,99)
READ(1,100) INO,NN,IR,LB,SIF,ALPH,DMAX,DMIN,DH
R=FLOAT(IR)/127.
RA=R*ALPH
SA=SIF*ALPH
WRITE(4,101) INO,NN,IR,R,SIF,ALPH,PA,SA
RT2=1./SQRT(2.)
RA2=RA*RA
PAIR=0.0174533

C
C INPUT DATA (DISKFILE,READ)
IPO=1
62 WRITE(4,211) IPO
NP=IPO-1
JM=1
32 NM=INO*(JM-1)
N=NN*1024
NO=NP+NM
N1=NO+1
WRITE(4,212) N1
DO 40 I=1,127
IREN(I)=0
40 CONTINUE
IC=0
IO=0
15 IC=IC+1
NO=NO*8
DO 7 II=1,8
IT=(II-1)*128+1
IM=IT+127
READ(7*NO+II-1) (IDATA(I),I=IT,IM)
7 CONTINUE

C
C IDATA COUNT (HISTGAM)
DO 41 I=1,N
IF(IDATA(I).LE.0) GO TO 13
IF(IDATA(I).GT.127) GO TO 13
K=IDATA(I)
IREN(K)=IREN(K)+1
GO TO 41
13 IO=IO+1
41 CONTINUE
DO 42 K=1,127
IF(IREN(K).NE.0) GO TO 43
42 CONTINUE
43 MIN=K
DO 44 MK=1,127
K1=128-MK
IF(IREN(K1).NE.0) GO TO 45
44 CONTINUE
45 MAX=K1
IF(IC.NE.NN) GO TO 15
N=N-IO

C
C HISTGRAM LB-KAIKYU NO HABA
IF(LB.EQ.1) GO TO 51
WRITE(4,50)
KK=1
MI=MIN-1
MA=MAX-1
DO 47 K=MI,MA,LB
LN(KK)=0

```

```

DO 46 M=1, LB
M2=M+K
LN(KK)=LN(KK)+IREN(M2)
46 CONTINUE
KK=KK+1
47 CONTINUE
KK=KK-1
MF=MIN
MB=MIN+LB-1
RK=FLOAT(MAX)*RA-SA
DO 48 J=1, KK
RKF=FLOAT(MF)*RA-SA
RKB=FLOAT(MB)*RA-SA
IF(RKB.LE.RK) GO TO 49
MB=MAX
RKB=RK
49 WRITE(4,57) MF, MB, RKF, RKB, LN(I)
MF=MF+LB
MB=MB+LB
48 CONTINUE
GO TO 53
51 WRITE(4,54)
DO 55 I=MIN, MAX
RK=FLOAT(I)*RA-SA
WRITE(4,52) I, RK, IREN(I)
55 CONTINUE
53 WRITE(4,56)

```

C

C

```

HEIKINCHI, HENSACHI
SUM1=0.
SUM2=0.
DO 10 I=MIN, MAX
FI=FLOAT(I)
FIR=FLOAT(IREN(I))
SUM1=SUM1+FI*FIR
SUM2=SUM2+FI*FI*FIR
10 CONTINUE
FN=1.0/FLOAT(N)
VB=SUM1*FN
VAR=SUM2*FN-VB*VB
SIGMA=SQRT(VAR)
J=1
DD=5.0
NC1=N
NC2=N
NC=N
MID=MIN
MAD=MAX
GO TO 27

```

C

C

```

DATA NO SENBETSU (DMAX TO DMIN ,DH)*HENSACHI
31 SI=DD*SIGMA
MID=0
IO=0
G=0.
SG=0.
11 DO 25 I=MIN, MAX
VO=FLOAT(I)-VB
IF(ABS(VO).GT.SI) GO TO 26
IF(MID.EQ.0) MID=I
MAD=I
GO TO 25
26 IO=IO+IREN(I)
FI=FLOAT(I)
FR=FLOAT(IREN(I))
G=G+FI*FR

```

```

      SG=SG+F1*F1*FR
25  CONTINUE
      NC1=N-10
      IF(NC1.EQ.NC) GO TO 29
      FN=1.0/FLOAT(NC1)
      VB=(SUM1-G)*FN
      VAR=(SUM2-SG)*FN-VB*VB
      SIGMA=SQRT(VAR)
      NC=NC1
      GO TO 31
29  IF(NC1.EQ.NC2) GO TO 24
      NC2=NC1
C
C   SKEWNESS FACTOR AND FLATNESS FACTOR
27  SUM3=0.
      SUM4=0.
      DO 14 I=MID,MAD
          V0=FLOAT(I)-VB
          V1=V0*V0
          FR=FLOAT(IREN(I))
          SUM3=SUM3+V1*V0*FR
          SUM4=SUM4+V1*V1*FR
14  CONTINUE
      SK=SUM3*FN/(VAR*SIGMA)
      FF=SUM4*FN/(VAR*VAR)
C
C   OUTPUT
      UBAR=VB*RA-SA
      DLTAU=SIGMA*RA
      P=FLOAT(NC1)/FLOAT(N)*100.
      DUD=DLTAU/UBAR
      WRITE(4,200) DD,NC1,P,VB,UBAR,SIGMA,DLTAU,DUD,SK,FF
24  V(J,JM)=VB
      S(J,JM)=VAR
      IF(DD.EQ.DMIN) GO TO 30
      J=J+1
      DD=DMAX-DH*FLOAT(J-2)
      NC=N
      VB=V(1,JM)
      SIGMA=SQRT(S(1,JM))
      GO TO 31
30  IF(JM.EQ.3) GO TO 39
      JM=JM+1
      GO TO 32
C
C   HEIKIN SOKUDO VECTOR (X,Y) RANRYUSOKUDO SEIBUN
39  WRITE(4,206)
      DO 35 I=1,J
          DD=DMAX-DH*FLOAT(I-2)
          IF(I.EQ.1) DD=5.0
          X1=V(I,2)*RA-SA
          X=((V(I,1)+V(I,3))*RA-SA*2.)*RT2
          DIF=X1-X
          Y=(V(I,3)-V(I,1))*RA*RT2
          UU=SQRT(X*X+Y*Y)
          UT=Y/X
          BETA=ATAN(UT)/PAIR
          DUXY=(S(I,3)-S(I,1))*RA2*0.5
          DUXY2=(S(I,3)+S(I,1))*RA2
          DUX2=S(I,2)*RA2
          DUX=SQRT(DUX2)
          DUY2=DUXY2-DUX2
          DUY=SQRT(DUY2)
          WRITE(4,202) DD,X1,X,DIF,Y,UU,BETA,DUXY,DUX2,DUX,DUY2,DUY
35  CONTINUE
65  IF(IPD.EQ.ING) GO TO 63

```

```
      IPO=IPO+1
      GO TO 62
63 STOP
50 FORMAT(/2X8HHISTGRAM,9X5HM/SEC,8X5HKOSUU/)
52 FORMAT(I5,F9.3,I5)
54 FORMAT(/2X17HHISTGRAM(M) KOSUU/)
56 FORMAT(/2X2HDD,3X2HNC,3X4HNC/N,3X3HBAR,3X7HUBAR(M),2X5HSIGMA,3X5HD
1U(M),3X7HDU/UBAR,5X2HSK,7X2HFF/)
57 FORMAT(I4,2H -,I4,1X1H(,F7.3,2H -,F8.3,1H),I6)
99 FORMAT(34HIND,?K,IR,LB,SIF,ALPH,DMAX,DMIN,DH)
100 FORMAT(4I3,5F8.3)
101 FORMAT(/25H2-ZIGEN NAGARE CAL. -LDV-//3X11HKEISOKU PO.,I4,2X2HN=,I
14,1HK,I4,1HV,2X2HR=,F9.6,3X4HSIF=,F4.1,3X5HALPH=,F7.3,3X3HRA=,F7.4
2,3H(M),3X3HSA=,F9.4,3H(M)/)
200 FORMAT(F4.1,I6,F6.1,F7.2,F9.4,F7.2,4F9.4)
202 FORMAT(F4.1,2F10.4,F9.3,2F10.4,F7.2,5F9.4)
206 FORMAT(///2X2HDD,5X4HX(O),4X7HX(+45),4X6HX(O)-X,3X7HY(+45),6X1HU,5
1X4HBETA,4X4HDUXY,5X4HDUX2,6X3HDUX,5X4HDUY2,6X3HDUY/)
211 FORMAT(/3HPO.,I3)
212 FORMAT(/2X3HNO.,I5)
      END $
```

付録D-C. データ解析プログラム定数, 変数の説明

	プログラム	
マニュアルインプットデータ	INO	; 測定点数(くり返し回数)
	NN	; 1測定点に対して何Kのデータを使うか
	IR	; トラッカーレンジ 1V, 2V, 5Vがある
	LB	; ヒストグラムの階級の幅をいくつにするか
	SIF	; シフト周波数電圧
	ALPH	; 電圧から風速に変換する定数
	DMAX	; データ選別時, 何倍の標準偏差値にはいるデータをとるかその上限
	DMIN	; " " " 下限
	DH	; DMAXからDMINまでDHおきに範囲を変える
ディスクインプットデータ	IDATA(I) I=1, NN	; IDATAはトランジェントレコーダから8ビットすなわち 1~127までの範囲の整数型の風速に関するデータ
データカウント, ヒストグラム	IREN(K) K=1, 127	; IDATAの度数をカウントする。
	MIN, MAX	; IDATAの最小値, 最大値
	LN(KK)	; LBの階級の和をしまう
平均値, 偏差値	N	; データの個数
	SUM1	; データの総和
	SUM2	; データの2乗の総和
	VB	; 平均値
	VAR	; 平方偏差
	SIGMA	; 標準偏差
その他	Vφ	; IDATA-VB
	SI	; データ選別時 Vφのはいる範囲
	SK	; 歪度(スキューネスファクター)
	FF	; 尖度(フラットネスファクター)
	RA	; IR ÷ 127 × ALPH IDATAを風速に直す定数
	SA	; SIF × ALPH 周波数シフトをした分風速から差し引く定数
	UBAR	; 平均速度(\bar{U})
	DLTAU	; 乱流速度($\Delta \bar{u}^2$)
	DUD	; 乱流率 ($\Delta \bar{u}^2 / \bar{U}$)
	X, X1	; X方向成分(平均風速) X → (ビーム ± 45°) X1 → (ビーム 0°)
	Y	; Y " \bar{U}_x, \bar{U}_y
	UU	; 平均速度ベクトルの大きさ \bar{U}
	BETA	; その方向
	DUXY, DUX2, DUY2	; 乱流速度成分 $\overline{u_{xy}}, \overline{u_x^2}, \overline{u_y^2}$

航空宇宙技術研究所報告521号

昭和53年1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 共 進
東京都杉並区久我山4-1-7(羽田ビル)
