

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-627

大型低速風洞用ファイバ式

三次元レーザ2焦点流速計設備

Part I その性能評価：二次元計測を中心として

高木正平・室田勝一

桑野尚明・萱場重男

1990年9月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

大型低速風洞用ファイバ式
三次元レーザ2焦点流速計設備
Part I その性能評価：二次元計測を中心として*

高木正平** 室田勝一**
桑野尚明** 萱場重男**

The Fibre Optic Three-Dimensional Laser-Two-Focus Velocimeter
for the Low-Speed Windtunnel
Part I Two-Dimensional Measurement Evaluations

Shohei TAKAGI, Katsuichi MUROTA, Naoaki KUWANO
and Shigeo KAYABA

ABSTRACT

A fibre optic three-dimensional Laser-Two-Focus(L2F)-Velocimeter was introduced in the Aircraft Aerodynamics Division in 1988.

The former half of the present report describes both an outline and the principle of this system for two-dimensional measurements. In the latter half, the L2F-Velocimeter is evaluated by using three types of flows, i.e., two-dimensional wake, three-dimensional boundary layer and quasi two-dimensional free jet with, and occasionally without, seeding particles. Furthermore, several seeding particles such as paraffine vapor, mosquito-repellent smoke and tobacco smoke are used for evaluations. The axial velocity component from the L2F-Velocimeter is pointwisely compared with a calibrated velocity. The comparison is extended to the transverse mean velocity component/fluctuating components with hot-wire measurements, in which great care was taken with the linearity and wire inclination. There is no incongruity in comparison except in low turbulence with less than 2% intensity to the local velocity. In summary, features of the fibre optic L2F-Velocimeter are its applicability to natural seed, wall-proximity and non-calibration measurements, although it is apriori known that the L2F-Velocimeter is not adaptable to both reverse flow and high turbulence measurements.

*平成2年6月21日 受付

**空力性能部

1. はじめに

レーザが開発されて 27 年あまり経過した現在、レーザの高出力化と光ファイバ方式の出現、並びに信号処理機の性能や操作性が格段に向上し、工学、医学など幅広い分野で、流れの計測や可視化に利用されるようになってきた。

当所の大型低速風洞においても、模型まわりの三次元流を光学的手法で測定するために、レーザ流速計を昭和 62 年度補正予算で整備した。

レーザ流速計の導入にあたっては、諸外国の大型風洞 (NASA, ONERA, DLR など) における利用状況、今までの使用経験と今後予想される風洞試験内容等を考慮して、次の項目を基本方針とした。

1) 翼面上の境界層測定 (速度分布、遷移点など)

においては、翼面近傍まで精度よく測定できること。そのためにはレーザ光の反射によるノイズが少ないこと及びレーザの測定ボリュームが小さいこと。

2) 動力、高揚力、操舵面等の装置を有する模型の後流は、複雑な三次元流であるので、各測定断面における三次元速度ベクトルを測定できること。

3) 大型低速風洞 (測定断面 6.5m × 5.5m) で使用する場合は、多点計測のためのトラバース機構が大規模になるため、レーザ光源部とプローブ部が光ファイバで分離され、トラバースが簡単に行えること。

4) 大型低速風洞における流れ場の測定においては、風洞の測定断面に均一な散乱粒子を人工的に発生させることが困難であるので、空気中に含まれている微粒子などにより測定できる可能性があること。

5) 低速から高速流 (模型エンジンの排気流等) に至る広範囲の流速測定ができること。さらに風洞測定部測定窓の構造、材質に余り影響されないで測定できること。

これらの項目を基に、最新の三次元測定用レーザ流速計について調査、検討した結果、壁面付近の計測能力、必要散乱粒子径、測定窓の材質、測

定流速範囲などの測定能力が特に優れている西独ポリテック社製の三次元レーザ 2 焦点流速計が導入された。

また、本レーザ流速計の導入と並行して、流速計の校正、検定および測定法の研究開発のために必要な低乱校正風洞やトレーサ実験装置 (煙風洞) を整備した。

本レーザ流速計導入後、調整試験、習熟運転、性能試験を経て、現在レーザ流速計測定法の研究を進めている。本資料は、レーザ流速計及び風洞設備の概要と小型の風洞で行った二次元測定を中心にした性能評価、実験結果 (円柱後流、境界層、自由噴流) について報告する。

2. 流速測定原理

レーザ 2 焦点流速計 (Laser - Two - Focus Velocimeter, 以後略して L2F 流速計と呼ぶ) の測定原理については文献 [1~3] に簡潔でかつ要を得た説明があるので、詳細をこれらの文献に譲り、ここでは簡単にふれることにする。

2.1 基本原理 (一次元測定)

L2F 流速計を次の様に説明することができる。図 1 に示すように 2 本のレーザビームを流れ方向に微小な距離 S 隔てて、焦点 I と II を結ばせる。この 2 本のビーム軸を含む面を流れ方向と一致させると、微粒子が連続して焦点 I と II を通過して 1 対の散乱光パルスが発生する。この 1 対のパル

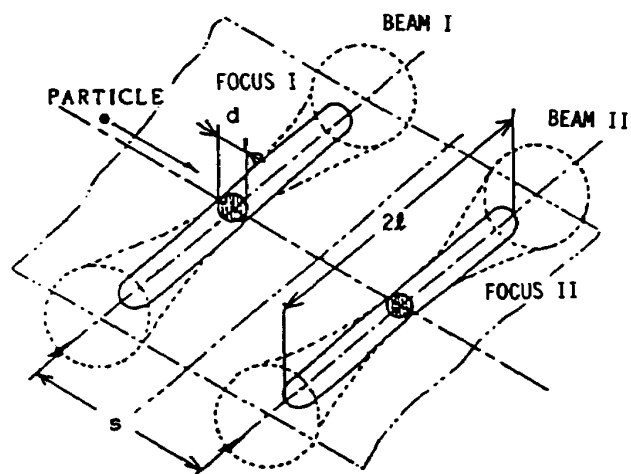


図 1 流れに入射された 2 本のレーザビーム、 S はビーム間隔、 $2f$ は焦点深度

ス時間間隔すなわち飛行時間 t から、個々の微粒子の移動速度 $U (= S/t)$ を測定する装置である。

このとき得られた速度は光軸に直角で、2本のビーム軸を結ぶ方向の速度成分である。なお本システムにおけるレーザビームの代表的な間隔 S は約 0.3mm 、ビーム径は約 $20\ \mu\text{m}$ 、焦点深度は約 0.5mm である。

しかし常に同一粒子が連続して焦点 I と II を通過する保証はないので、誤ったデータは多数のデータを収集し、次に示すように統計的手法を用いて排除される。

図2は粒子の飛行時間に対する検出粒子数の度数分布 (TOF と略記: Time Of Flight) を表わしている。同一粒子によるデータはある一定の相関分布をなすが、異った粒子による誤ったデータは相関がないために図2の飛行時間全範囲に一樣に分布する。

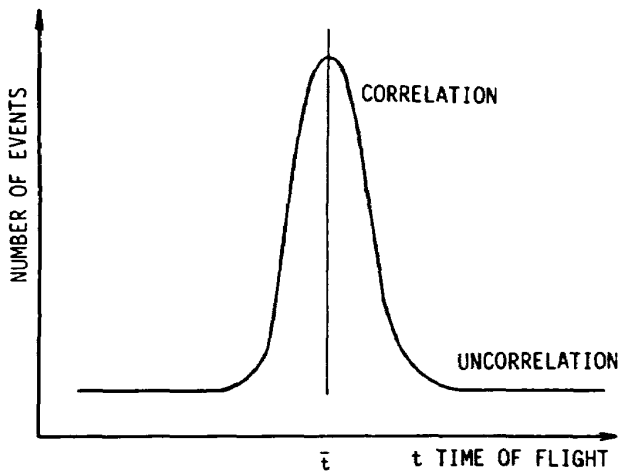


図2 飛行時間に対する度数分布

平均粒子速度すなわち平均流体流速は分布のピークに対応する平均飛行時間 \bar{t} より求まる。一方分布が広がるのは流れに存在する乱れのためである。この乱れが大きくなると TOF 分布の幅は広がると共にピークの高さも低くなり、測定時間が長くなる。次節で述べるが、この TOF 分布を構成するデータから無関係データを差し引き、乱れの強度を推定することができる。

2.2 二次元測定

流れには一般に乱れが存在するために、流れ角

は時間的に絶えず変化している。このような流れ角を測定するためには、図3に示すように2つの光軸が作る面 (光軸面と呼ぶ) の回転角 α を変える必要がある。この回転角 α を順次変化させ、焦点 I を通過する粒子数を一定にして、度数分布を求めると図4のような二次元度数分布が得られる。この二次元度数分布のピークに対応した飛行時間と回転角から平均流速と平均流れ角すなわち流速ベクトルが求められる。

前節で述べた一次元測定は実用的には利用価値は非常に低いので、導入した L2F 流速計には二次元ないしは三次元測定モードだけである。ただ

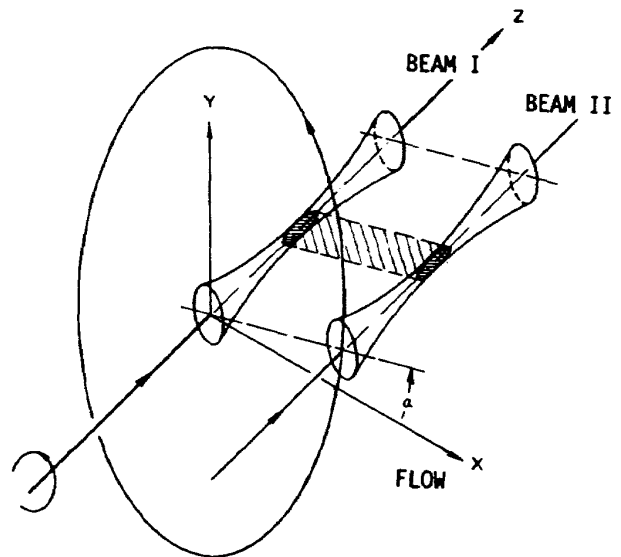


図3 二次元流速測定のためのビーム回転

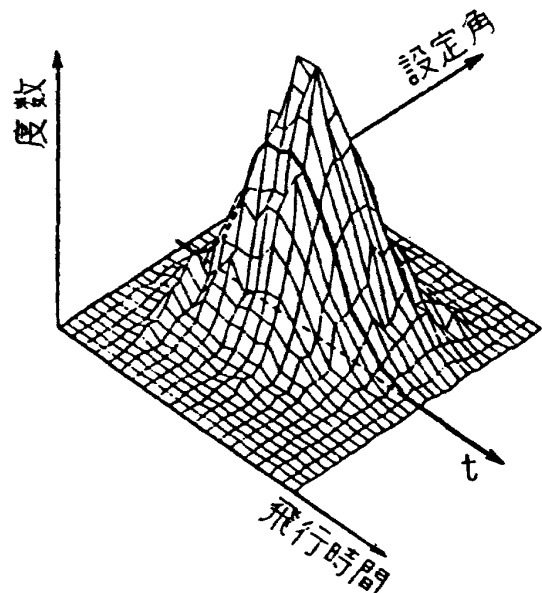


図4 飛行時間と回転角に対する二次元度数分布

測定を開始する前の初期条件すなわちゲート時間、ビーム回転角、そのステップ数及びデータレート等の設定に関し、擬似的ではあるが一次元測定が用意され、手でビームを回転させながら TOF 分布を観測することができる。次に二次元度数分布から速度ベクトルや乱れの強度を求める方法について述べ、それらの誤差についても評価する。流れは一般に三次元であるので、まず三次元度数分布 $P(\vec{U}, \vec{X})$ を先に考える。ここに \vec{X} は三次元空間座標 (X, Y, Z) を、 U は各軸方向の速度成分 (U, V, W) を表わすものとする。今、任意の速度関数 $F(\vec{U}, \vec{X})$ を導入すると、平均値 $\bar{F}(\vec{X})$ は

$$\bar{F}(\vec{X}) = \iiint_{-\infty}^{+\infty} F(\vec{U}, \vec{X}) \cdot P(\vec{U}, \vec{X}) dU \cdot dV \cdot dW \quad (1)$$

となる。ただし $\iiint_{-\infty}^{+\infty} P(\vec{U}, \vec{X}) dU \cdot dV \cdot$

$dW = 1$ とする。速度関数 $F(\vec{U}, \vec{X})$ として、たとえば U をとれば

$$\bar{U} = \iiint_{-\infty}^{+\infty} U \cdot P(\vec{U}, \vec{X}) dU \cdot dV \cdot dW \quad (2)$$

となって X 軸方向の平均流速 \bar{U} が求められる。

さて実際の測定では、図 4 に示したように二次元度数分布が得られているのみであるが、この度数分布 $P^+(U, V, \vec{X})$ が

$$P^+(U, V, \vec{X}) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\vec{U}, \vec{X}) dW \quad (3)$$

なる条件を満足できれば、(1)式から二次元統計量を求めることができる。この条件を満足するために、L2F 流速計の 2 本のビーム光軸の測定領域の長さ（この場合 Z 軸方向に $\pm l$ ）はできるだけ長くなるように設計されている。本システムでは l はビーム間隔 S と同程度である（図 5 を参照）。したがって(3)式の仮定が成立する範囲が乱れ測定の限界を示すことになる訳で、後述するように、平均流速に対する乱れ強度は 30% 以下とされている。

図 6 に示すように光軸直角平面内で速度ベクトルとビーム回転角との関係から

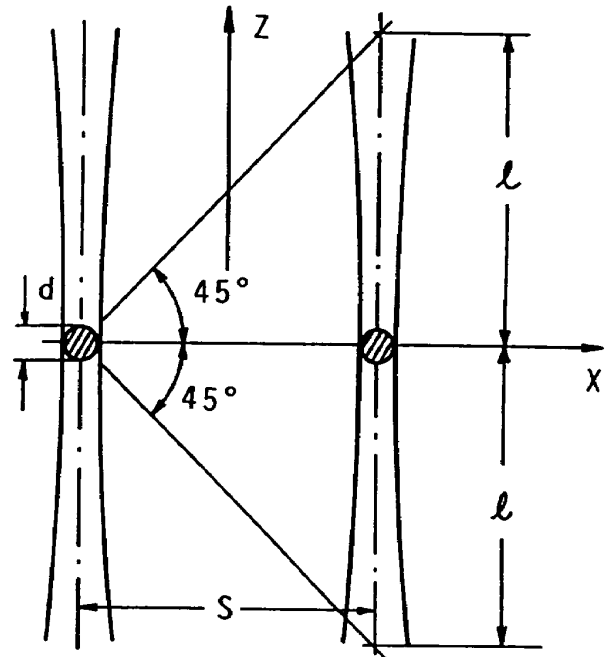


図 5 2本のレーザービームと焦点深度

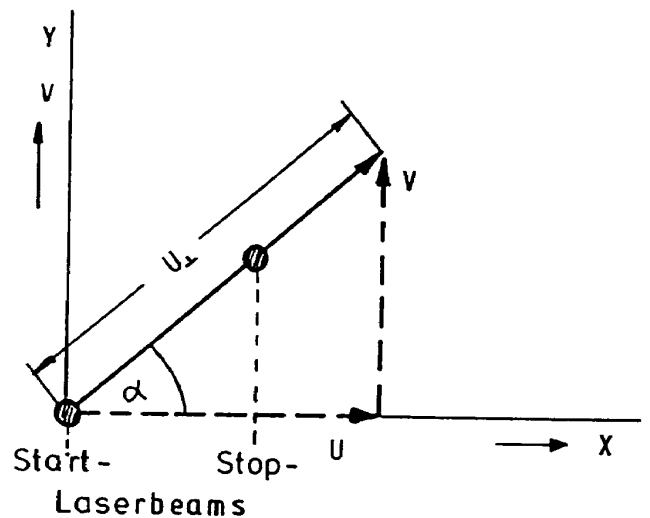


図 6 ビーム回転と速度ベクトル

$$\begin{aligned} U_{\perp} \cos \alpha &= U \\ U_{\perp} \sin \alpha &= V \end{aligned} \quad (4)$$

であるから、(1)及び(3)式から

$$\bar{F}(\vec{X}) = \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} F(\alpha, U_{\perp}, \vec{X}) P^+(U, V, \vec{X}) U_{\perp} dU_{\perp} \cdot d\alpha \quad (5)$$

となり、さらに飛行時間 t 、ビーム間隔 S 及び速度 U_{\perp} の間に成立する関係 $t = S / U_{\perp}$ を用いると、(5)式は

$$\bar{F}(X) = \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} F(\alpha, t, X) P^+(\alpha, t, \vec{X}) \frac{S^2}{t^3} dt \cdot d\alpha \quad (6)$$

となる。ここに $F(\alpha, t, \vec{X}) = 1$ のとき $\bar{F}(X) = 1$ とする。ここでさらに $P^{++}(\alpha, t, \vec{X}) = P^+(\alpha, t, \vec{X}) S^2 / t^3$ とすれば、

$$\bar{F}(\vec{X}) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty F(\alpha, t, \vec{X}) \cdot P^{++}(\alpha, t, \vec{X}) d\alpha \cdot dt \quad (7)$$

となる。 $P^{++}(\alpha, t, \vec{X})$ の2つのMarginal分布関数は

$$P_a(\alpha, \vec{X}) = \int_0^\infty P^{++}(\alpha, t, \vec{X}) dt \quad (8)$$

$$P_t(t, \vec{X}) = \int_0^{2\pi} P^{++}(\alpha, t, \vec{X}) d\alpha \quad (9)$$

であるから、(7)式は近似的に

$$\bar{F}_R(\vec{X}) = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty F(\alpha, t, \vec{X}) \cdot P_a(\alpha, \vec{X}) \cdot P_t(t, \vec{X}) d\alpha \cdot dt \quad (10)$$

が成り立つ。ここで $\bar{F}_R(\vec{X})$ の誤差を評価するために、 U 及び V の振幅確率密度分布が二次元 Gaussian 分布に従うと仮定して、 $(\bar{F}_R / \bar{F} - 1)$ を計算した。その結果を、乱れ強度に対し ρ をパラメータとして図7に示す^[2]。ここに ρ は U と V 変動の相関係数とする。この結果によると乱れ度 20% までは、平均流速についての誤差は 1% 以下で、乱れについても 5% 以下であり、実際の測定誤差と同程度となって、(10)式の仮定は実用上

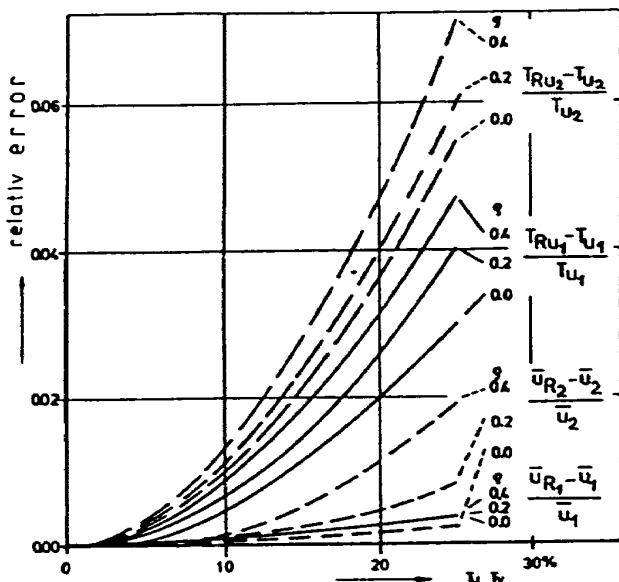


図7 近似計算による誤差評価

問題ないように思われる。しかし乱れ強度が 30% に達すると、その誤差が大きくなることや2本のビームを通過する確率 (図10参照) が小さくなって測定時間が膨大になり、30%程度の乱れ強度が実用上の測定の限界となる^[2,4]。

なお、(10)式に基づいたデータ処理法の実例は文献[2]と[4]に詳しいので、ここでは割愛する。

2.3 流速測定誤差と誤差補正

L2F流速計のレーザビームはLDVのそれに比べておよそ百倍の集光度を有するが、それでもビーム間隔に対してビーム径が無視できないために測定誤差が生ずる。図8はこの誤差を説明するための焦点位置における光軸直角方向のビーム断面図を示し、ビーム間隔 S に対しビーム径 d を太くし、実際よりかなり誇張して描いてある。散乱粒子が X に沿ってビームを通過する場合は、平均経路長は S となるが、今流れに存在する速度変動によって散乱粒子が X' のように2本のビームの接線に沿って通過する場合の平均経路長 S' は S より短い。幾何学的関係から

$$S' = S \sqrt{1 - (d/S)^2} \quad (11)$$

となるが、標準レンズ $f=500\text{mm}$ では $d=18\mu\text{m}$, $S=265\mu\text{m}$ から、誤差 $\epsilon = 1 - S'/S$ は、 $\epsilon = 0.23\%$ 、表IIIに示すAmiciプリズム (詳しくは第3章で述べる) の最悪のケース (Color No. 2とNo. 3) $d=13\mu\text{m}$, $S=104\mu\text{m}$ でさえ、 $\epsilon = 0.8\%$ であり大部分の測定では無視してもさしつかえな

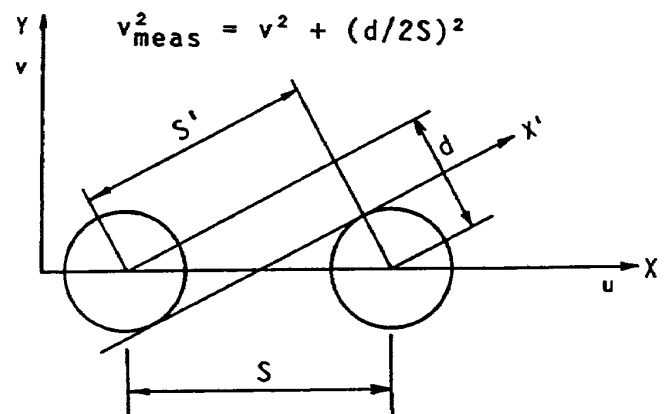


図8 散乱粒子経路

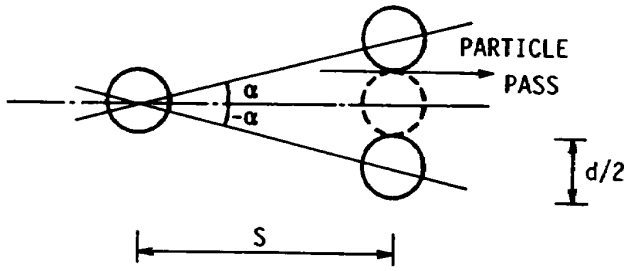
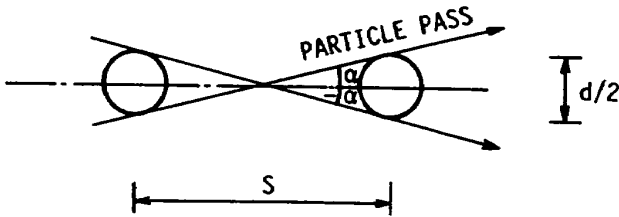
(a) ビームが $\pm\alpha$ だけ回転角する場合(b) 粒子が $\pm\alpha$ で入射する場合

図9 測定誤差の機構説明

い程度であるが、留意はすべきであろう。

d/S が小さくないために生ずる誤差はこの他に乱れ測定の際にも起こる。図9はこのような誤差が生ずる機構を図式化したもので、(a)では乱れない理想的な流れの中で下流側のビームが回転する場合を考える。 $\alpha = 0$ のとき、2焦点内を同一粒子が通過する確率は1であるが、 $|\alpha|$ を大きくとるにつれてその通過する確率は減少し、 $|\alpha| = \tan^{-1}(2r/S) \approx d/2S$ で0となる。

一方(b)ではビームは固定したままでも、流れ角が $|\alpha| \leq d/2S$ の範囲では粒子が2本のビームを通過する確率は0とはならない。この2つの場合の間にはアナロジーが成り立ち、流れに乱れが存在しない場合でも、L2F流速計の流れ角分布(8式)の標準偏差 σ_a は $d/2S$ となって、 $v' = d/2S$ なる乱れが誤差として測定されてしまう。焦点距離500mmの標準光学ヘッドでは $d/2S = 18/530$ で、 $v' = 3.4\%$ となる。

流れに乱れが存在する場合には、図9(a)と(b)が同時に起こると考えればよい。このときの測定される流れ角分布の標準偏差を v'_{meas} とすると

$$(v'_{meas})^2 = (v')^2 + (d/2S)^2 \quad (12)$$

であることが簡単に示される^[2]。ただし v' は主流と直角方向の乱れ強度で、主流乱れ強度 u' と

等しく、流れは等方的と仮定する。この(12)式を以後誤差補正式と呼ぶことにする。

実際の速度変動 v' を求める補正プログラムは(12)式に基づいて行われるが、そのために d 及び S 等は測定前の初期条件設定file(後述する図18(a)参照)に登録しておかなければならない。この際、低乱流測定では正しい d を登録しておかないと大きな誤りを犯す。たとえば焦点距離500mmの標準レンズでは $d = 18\mu\text{m}$ では、 $v' = 0.52\%$ のとき、表IIIに示された $d = 13\mu\text{m}$ をそのまま用いると、 $v' = 2.2\%$ となるからである。

2.4 ビーム間隔と乱れ強度

本流速計では低乱流から高乱流測定まで対処できるよう、1つの光学系でいく通りかのビーム間隔を適当に選べるAmiciプリズムが用意されていることを述べた。低乱流測定ではビーム径が一定ならばビーム間を広くとればよいことを前節で述べたが、高乱流では逆にその間隔を狭めると2本のビームを通過する粒子の確率が増し、測定時間の短縮が図れる訳である。同一粒子が2本のビームを通過する確率 P_{succ} は乱れ強度 v' 、ビーム径 d 及びビーム間隔 S の関数である。すなわち

$$P_{succ} = 1/\sqrt{1 + \left(\frac{2S}{d}v'\right)^2} \quad (13)$$

と表わせる^[2]。ただし速度場は等方的で $u' \cong v'$ とする。表IIIに示したAmiciレンズは6種類のビーム間隔が選べる。この6種類の中でビーム径に対するビーム間隔が最大と最小となる $d/S = 13/104$ と $13/454$ について(13)式を計算した結果を図10に示す。本報告の中で最も多用されたレンズ($d/S = 18/265$)についての P_{succ} を比較のために図示した。乱れ強度を周波数に対応付けるならば、パラータ d/S はちょうどフィルタの遮断周波数に対応している。したがって d/S が小さければ低乱流にも感度がよく、逆に d/S を大きくすると(12)式に基づいて誤差も増大するかわりに高乱流場でも2本のビームを通過する確率が増して測定時間の短縮が図られることが分かる。 $d/S = 18/265$ のレンズはこの両者の中間に位置し、中乱流場測定に向いていると言える。

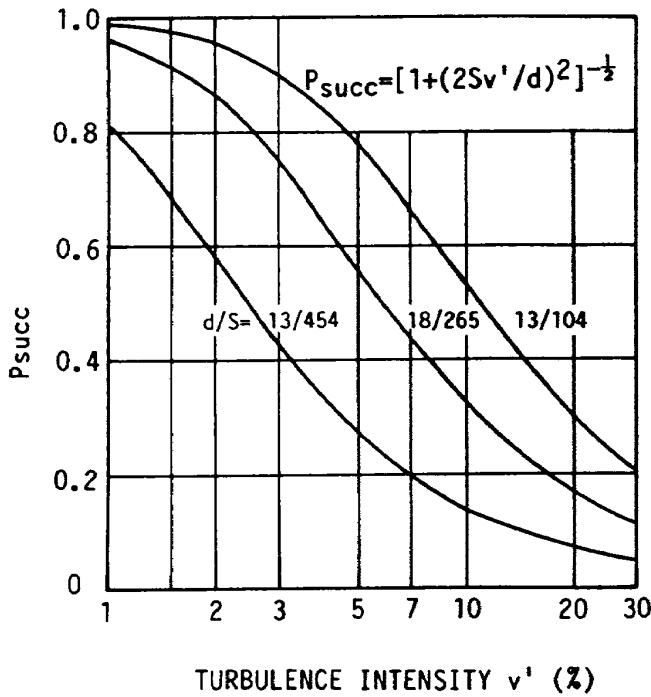


図10 ビーム径/ビーム間隔に対する
粒子通過確率

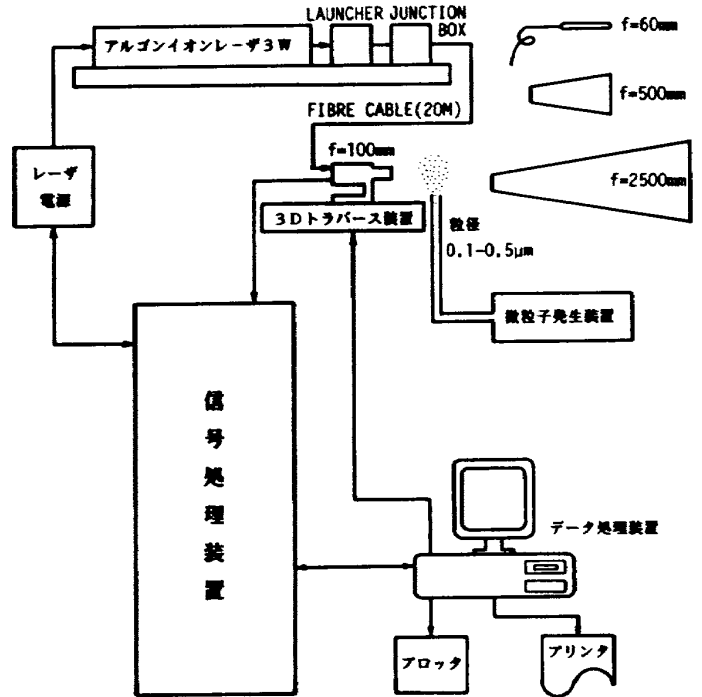


図11 L2F 流速計構成図

3. L2F 流速計の基本構成

導入した光ファイバ式三次元L2F 流速計の基本仕様を表Iに、その基本構成を図11に、その概観を図12に示す。また基本構成の詳細を表IIに、付属光学レンズ一覧表を表IIIに示す。L2F

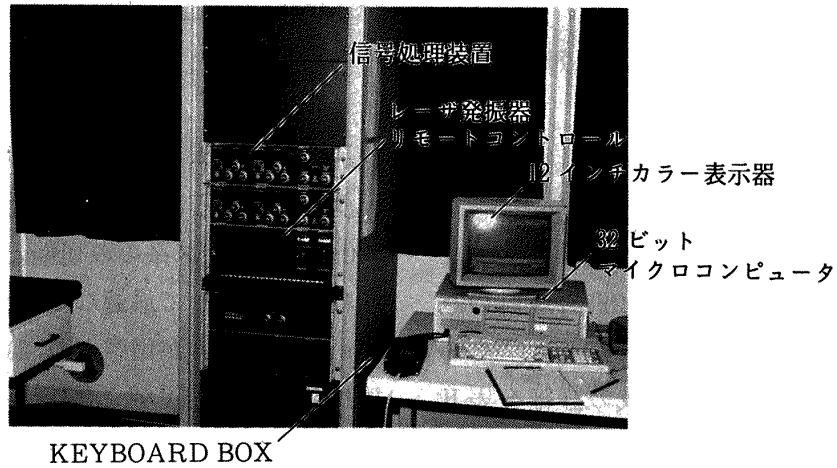
流速計システムの焦点距離4種のレンズ系は二次元測定を基本とし、三次元測定は $f=100\text{mm}$ と $f=500\text{mm}$ のレンズ系のみ可能となっている。一方乱れ強度に応じて最適なビーム間隔が選べるよう、Amiciプリズムが用意されている。低乱流測定には長いビーム間隔が、高乱流には短いビーム間隔が選ばれる。ビーム間隔と乱れとの関係は第2

表I Polytec ファイバ式三次元レーザ2焦点流速計一般性能

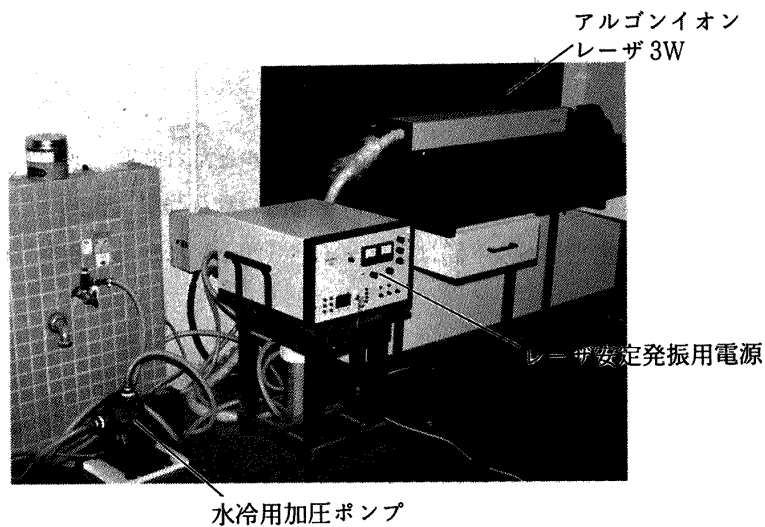
測定方式:	二次元測定 単色レーザ2焦点方式 三次元測定 2色レーザ2焦点方式
測定量:	二次元測定 光軸直角平面内の平均速度ベクトルと乱れ強度二成分 三次元測定 平均速度三成分と光軸直角平面内の乱れ強度二成分
型式:	レーザ光源と測定光学ヘッド間は光ファイバ(20m)による分離型で後方散乱方式
測定対象流体:	空気
流速測定範囲:	0.5m/sec ~ 3000m/sec
乱れ強度:	30%以下
光学系対物レンズ	
焦点距離:	60mm, 100mm, 500mm および 2.5m
基本光学系	
ビーム:	360°回転, 最小分離能 0.36°
飛行時間	
計測:	ゲート時間間隔 640nS ~ 20mS (倍々16ステップ)



(a) 三次元トラバース装置に設置した焦点距離 500mm の光学ヘッドを用いた測定風景 (図 32 参照)



(b) 信号処理装置とデータ処理装置



(c) レーザ発振器とポンプ

図 12 L2F 流速計概観

表II ファイバ式三次元レーザ2焦点流速計の構成

1. レーザ光源	Lexel社 3W Argon Ion Laser (マルチラインタイプ195), 水冷式
2. 光学系	Piezo 微動調整器付 Fiber Launcher Fiber Junction Box Fiber Link Cable 20m 標準光学ヘッドベース (ビーム回転用モータ組込) Beam Expander ($f=500\text{mm}$, 二次元, 三次元共用) Beam Expander ($f=2.5\text{m}$, 二次元用) 小型ペン式光学ヘッド ($f=60\text{mm}$, 二次元用)
3. Prism Lens	Beam Splitter 2種 ($9' 30''$, $5' 30''$) 波長分散型プリズム Achromatic 対物レンズ ($f=100\text{mm}$, 二次元用) Non-achromatic 対物レンズ ($f=100\text{mm}$, 三次元用) Beam Expander 用レンズ ($f=-100\text{mm}$)
4. 信号処理装置	光電子増倍管・電源 Unit (各4組み) Filter/Discriminator Unit (4台) Time of Flight Counter (2台) Data Transfer Control Unit Fiber Launcher 用 Piezo Control Unit Laser Power Remote Control Unit ビーム回転 Remote Control Keyboard Box
5. データ処理装置	Disk Top 型 32bit マイクロコンピュータ, 主メモリ 2MB 12 インチカラー表示器 Multi Channel Analyzer Board (MCA) GP-IB Board (三次元トラバース装置制御用) RS-232C 2系統 Mouse (MS DOS, WINDOW の下で) 二次元または三次元データ処理ソフトウェア プリンタ, プロッタ
6. 微粒子発生装置	Polytec 社微粒子装置, 粒子源 (パラフィン, 溶剤トリクロロエチレン), 粒子径 ($0.1\sim 0.5\mu\text{m}$)
7. 三次元トラバース装置	ストローク X軸 1,000mm, Y軸 500mm, Z軸 500mm, 最小移動量 0.005mm

表Ⅲ レンズ一覧表

1. 焦点距離 $f=100\text{mm}$ (二次元用)

Beam Splitter	Beam Separation (μm)	Beam Dia. (μm)
Wollaston 9' 30"	2 7 7	1 4
" 5' 30"	1 5 8	1 4
Amici Color No. 1, 2	1 9 1. 5	1 4
" 1, 3	2 9 3	1 4
" 1, 4	4 4 3	1 4
" 2, 3	1 0 2	1 4
" 2, 4	2 5 2	1 4
" 3, 4	1 5 0	1 4

2. 焦点距離 $f=100\text{mm}$ (三次元用)

Beam Splitter	Beam Separation (μm)	Beam Dia. (μm)
Wollaston 9' 30"	2 7 5	1 4
" 5' 30"	4 5 7	1 4

3. 焦点距離 $f=500\text{mm}$ (二次元用)

Beam Splitter	Beam Separation (μm)	Beam Dia. (μm)
Wollaston 9' 30"	2 7 8	1 3
" 5' 30"	1 6 2	1 3
Amici Color No. 1, 2	1 9 5	1 3
" 1, 3	3 2 6	1 3
" 1, 4	4 5 4	1 3
" 2, 3	1 0 4	1 3
" 2, 4	2 5 8	1 3
" 3, 4	1 5 4	1 3

4. 焦点距離 $f=2500\text{mm}$ (二次元用)

Beam Splitter	Beam Separation (μm)	Beam Dia. (μm)
Wollaston 9' 30"	7 8 0	4 0
" 5' 30"	4 4 1	4 0

5. 焦点距離 $f=60\text{mm}$ (二次元用)

Beam Splitter	Beam Separation (μm)	Beam Dia. (μm)
	2 7 7	1 4

章で述べた。

以下システム構成の概略を個別ごとに示す。

3.1 レーザ発振器とパワーメータ

L2F 流速計の光源として LEXEL 社製出力 3W のマルチライン型アルゴンイオンレーザが用いられる。このレーザ光は波長 457.9 nm から 514.5 nm の間に 6 種類の波長で構成されている。各波長の強度比は出力に依存する。たとえば二次元測定ではレーザ出力をおよそ 1W にするが、この出力では波長 514.5 nm (緑色) のパワーが最も強く、出力を 1.5W にすると、波長 514.5 nm と 488 nm (青色) の強度は同程度となり、三次元測定にこの二色が用いられる。

レーザ発振器は手元操作の他、信号処理用筐体に収められた制御回路によって遠隔操作もできる。この発振器は水冷式で、冷却のためにはフィルタを通した水道水が用いられている。フィルタを通すと水道の水圧は低下するので、ポンプで加圧した。レーザビームの強度測定のために LEXEL 社製のパワーメータ (0.2mW~10W) が用意されている。

3.2 光学ヘッド及び LAUNCHER と JUNCTION BOX

発振器からの平行レーザビームを効率よく光ケーブル内に導くために LAUNCHER が用いられる。

LAUNCHER はねじによる粗調整機構と Piezo 素子を用いた電気制御による精密調整機構とから構成されており、ミクロンオーダの位置決め調整が行なえる。JUNCTION BOX は光学ヘッドに内蔵されたパルスモータの制御線と光ケーブルを中継し、容易に着脱可能となっている。焦点距離 60mm のミニプロップ光学ヘッドと焦点距離 100 mm の標準光学ヘッドは 2 系統の長さ 20m の光ケーブルと JUNCTION BOX が独立に用意されている。長焦点の光学ヘッドを構成する場合には焦点距離 100mm の標準光学ヘッドをベースに、焦点距離 -100mm のレンズと焦点距離 500mm 用あるいは焦点距離 2.5m 用の Beam Expander を用いる。焦点距離 100mm と 60mm の光学ヘッド内の詳細を図 13 に示す。いずれの光学ヘッドも基本構成は同じであるが、レーザビームは Wollaston Beamsplitter[Ⓔ]によって等分に分配され対物レンズ[Ⓒ]によって焦点を作る。

計測時には 1 つのビームの回りを中心に他のビームを回転させるために、Wollaston レンズ[Ⓔ]が用

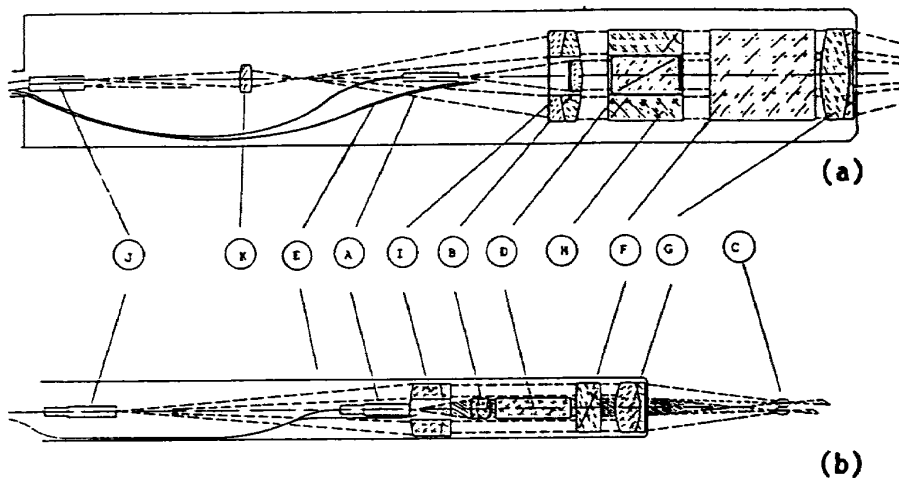


図 13 光学ヘッド内部構造

(a) $f=100\text{mm}$ 標準光学ヘッド

(b) $f=60\text{mm}$ ミニプロップ光学ヘッド

Ⓐレーザビーム発射端子 Ⓑ非 Collimation lens Ⓒ焦点

ⒹGlan-Thompson Polarizer ⒺMultimode Fibre ⒻWollaston Prism ⒼFront Lens

ⒽRochon Prism ⒿInternal lens Ⓚ受光ファイバ ⓁBeam Expansion Lens

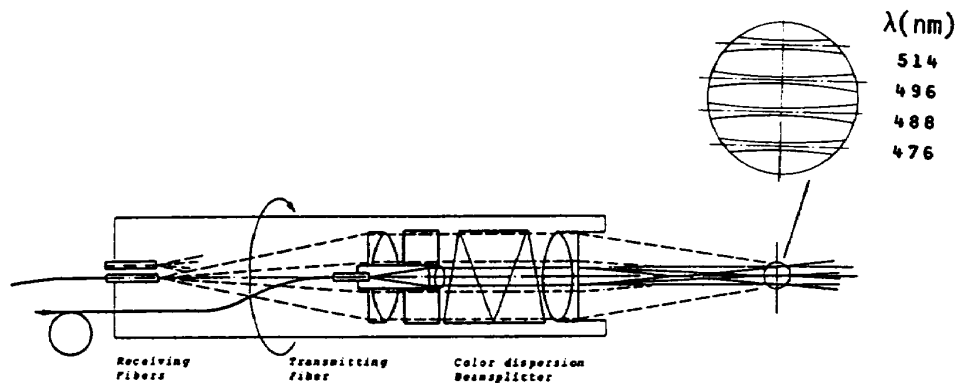


図14 Multi-Color用光学ヘッド内部構造

いられその回転のために最小回転角 0.36° のパルスモータが組込れている。本L2F流速計は後方散乱方式を採用しており、粒子からの散乱光はフロントレンズ③で受光し、光学ヘッド内のレンズ系に導かれる。フロントレンズ③を通過した散乱光は平行化され、さらにWollaston Beamsplitter ⑤を通り、Rochon Prism ④に達する。そして散乱光はインターナルレンズ①で集光され、受光用ファイバ②に入射され伝送される。

図14には図13(a)で用いたWollaston BeamsplitterをMulticolor用のColor splittingプリズムを用いた構造が示れされている。すなわち波長によって屈折角の違う性質を利用したプリズム(Color Dispersion Beamsplitter)が用いられる。各波長の焦点位置には流れ方向に沿って番号が付けられ、表Ⅱにも示したように、番号の組合せでビーム間隔が選択される。

3.3 信号処理装置

信号処理装置は図11ですでに示したように、1つの筐体内に収められている。ここでは各信号処理ユニットの概略配置を図15に示す。光学ヘッドで検出された散乱光はまず光電子増倍管(Photo Multiplierあるいは単にPM管と呼ぶ)に導かれる。Multicolor用プリズムを用いた二次元測定ないしは三次元測定のために都合4台のPM管(図15のA)がその電源(B)と共に筐体内に収納されている。標準光学ヘッドを用いた二次元計測ではこのうち2台が用いられる。PM管出力信号はFilter/Discriminatorユニット(C)

内の前置増幅器を経た後、Filterで高周波ノイズが除去され、Discriminator回路で検出信号のピークを捕えてパルス列に変換されてから、StartパルスないしはStopパルスとして後の処理に用いられる。高周波ノイズを除去するためのFilterの平均時間 T の設定は、流速 V の測定に直径 d のビームを用いたならば $T=d/2V$ が目安となる。たとえば $V=75\text{m/S}$ 、 $d=18\mu\text{m}$ ならば $T=125\text{Sec}$ と設定すればよい。このFilter/Discriminatorユニットは各PM管と対となっており、計4台ある。PM管出力とFilter/Discriminatorユニットとのつなぎ替えはCのキーにて行なう。PM管の感度設定はFilter/Discriminatorユニット内にある多回転ダイヤルで行なうが、散乱光の強度に依存するために、データレートや表示器のTOF分布のノイズレベル(無相関粒子数)を見ながら設定する。シーディングとしてパラフィンを用いる場合は通常データレートは200~400Hzが目安である。なおPM管で検出された信号がパルス列に変換されるまでのブロックダイアグラムを図16に示す。StartパルスとStopパルスの時系列データはTime-Of-Flight(TOF)カウンタ(C)へ導かれる。StartからStopまでの時間間隔は高速A/D変換器で8ビットのデジタル値に変換される。この方法は高速にデータを処理するための一手法で、時間波高変換と呼ばれ、TOFカウンタユニットに内蔵されている。さらにこれらのデータはデータ処理装置内のMCA(Multi-Channel Analyzer)ボードに転送され、図4に示したような二次元度数分布が求められる。

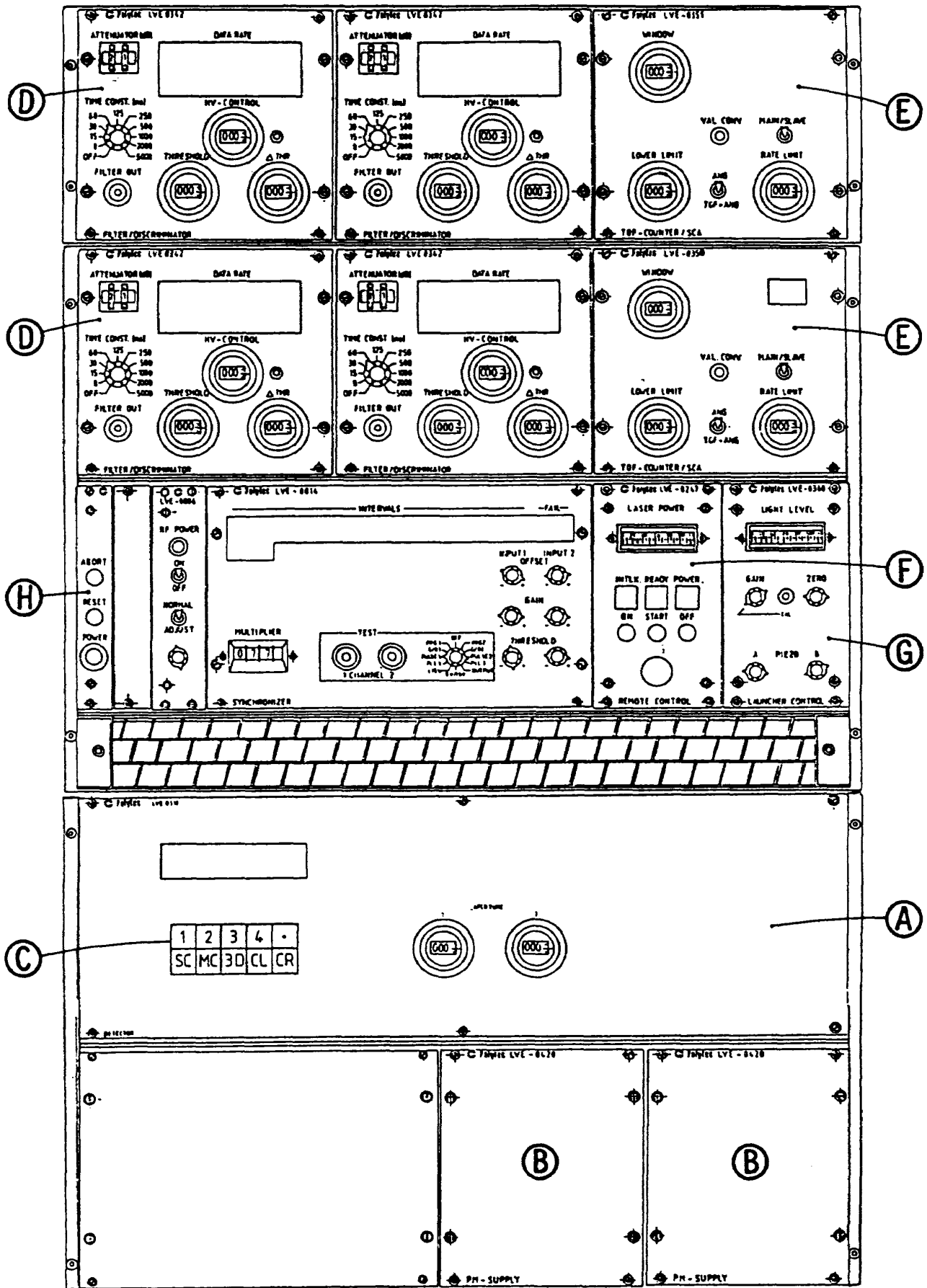


図15 信号処理装置各ユニットの配置

- Ⓐ光電子増倍管4台, Ⓑ, Ⓐの電源2台, Ⓒ光路選択用キー,
- ⒹFilter/Discriminator ユニット4台, ⒺTOFカウンタ2台,
- Ⓕレーザ発振器制御ユニット, ⒼLauncher用Piezo制御ユニット, Ⓗ主電源

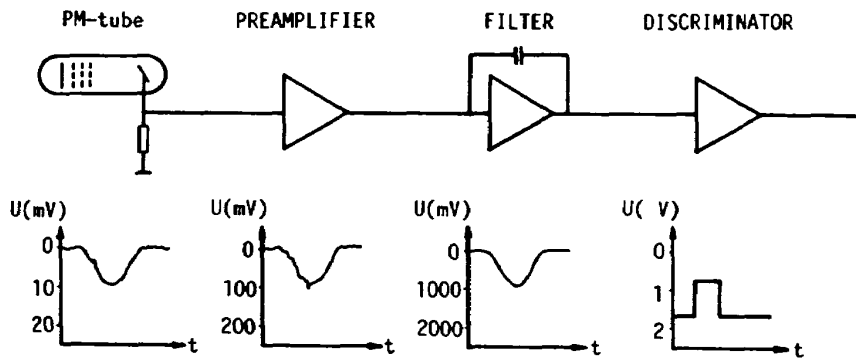


図 16 信号検出からパルス整形までの信号処理

またデータ転送に関しては RS232C を介して信号処理装置内の SMD ユニットが管理している。以上の一連の散乱光検出からデータ処理までのブロック図の概略を図 17 に示す。

3.4 データ処理装置及びソフトウェア

IBM 系マイクロコンピュータ PC/AT 機と互換のある Compaq 386 Deskpro がデータ処理に用いられている。データ処理装置本体には 1.2 MB のフロッピーディスクと 40MB のハードディスク各 1 台、高速演算器、主メモリ 2 MB、先に述べた MCA ボードの他に、GP-IB ボード及び RS-232C 2 回線が標準装備され、周辺装置として 12 インチのカラー表示器、9×17 ピンドット式プリンタ及び A3 サイズの X-Y プロッタが

ある。

計測には Polytec 社が納入した MS-DOS 管理下の二次元ならびに三次元測定ソフトウェアが用いられる。その主な機能はデータファイルの作成、測定初期条件、測定、データの保存、データ表示作図ならびにその出力等であり、これらの操作はマウスと WINDOW を用いた便利なシステムとなっている。また三次元トラバース装置を用いた自動計測は GP-IB を仲介して可能となっている。

測定プログラムが走る前には初期条件を設定保存する File の作成が必要で、その一例を図 18(a) に示す。ここでは流速に応じて正しい TOF レンジの設定、乱れ強度に応じて回転ステップ角やステップ数、1 ステップ当りの検出粒子数等が打込まれ、測定後ビーム間際は流速換算に、ビーム径とその間隔は 10 式の測定誤差補正に用いられる。

図 18 (a) の項目の中で、Stations per Blade から Specific Heat までは回転を伴う翼間の流れを計測する際に必要な項目である。従って記入された数値は本測定では全く用いていない。

図 18 (b) は測定結果を表示したもので、二次元と三次元測定と共用している。CQ は主流方向の流速、TPAR と TSEK は主流流速 CQ に対する主流及びそれと直角方向の乱れ強度の百分率を示す。

次に、主流流速が約 10m/S、その乱れ強度が約 1.3% である自由噴流中心における TOF と Angular 分布表示のハードコピーを図 18 (c) と (d) に示す。図 18 (e) と (f) には主流流速が 30m/S で、その乱れ強度が約 10% である円柱後流中心で、円柱直径の 30 倍下流における TOF と Angular 分布表示のハードコピーを示す。噴流及び円柱後

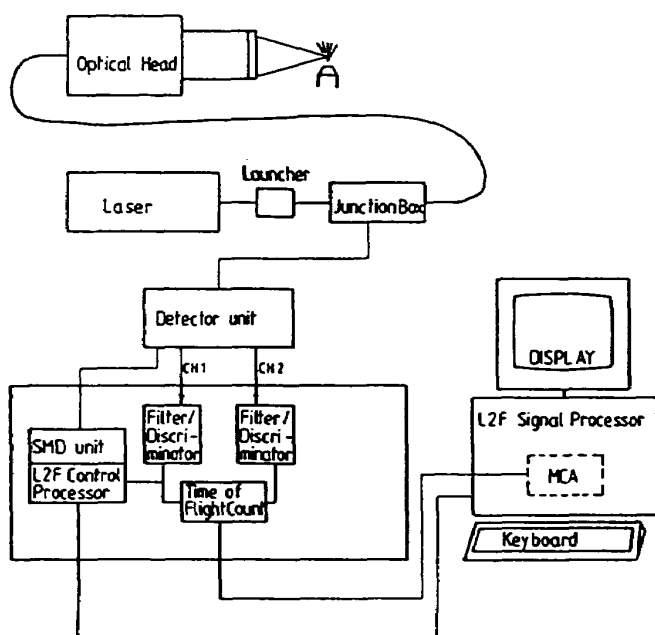
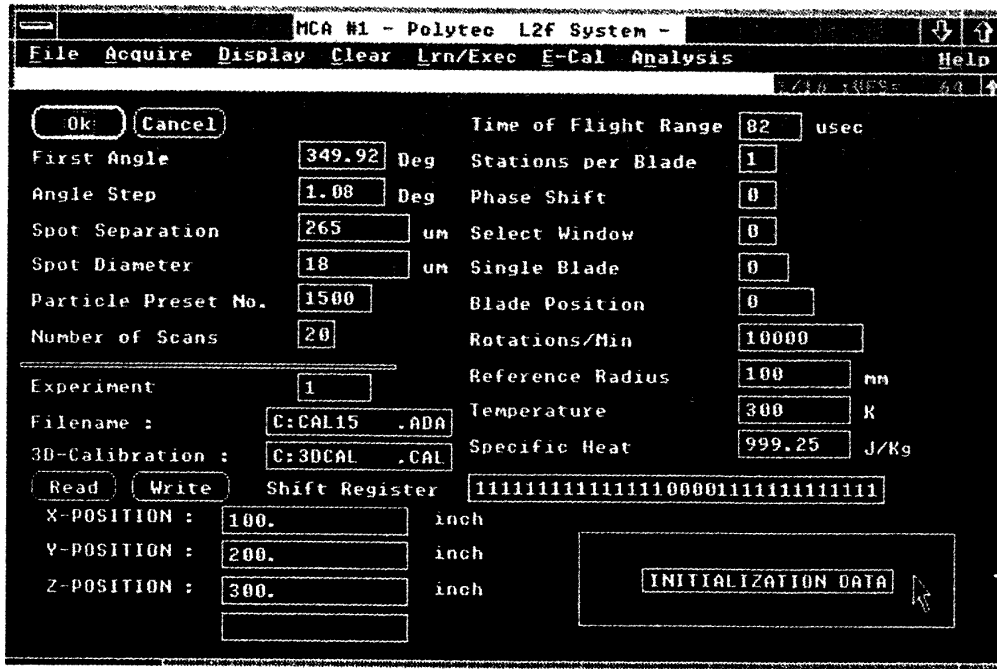


図 17 光ファイバ式 L2F 流速計のデータ処理の流れ

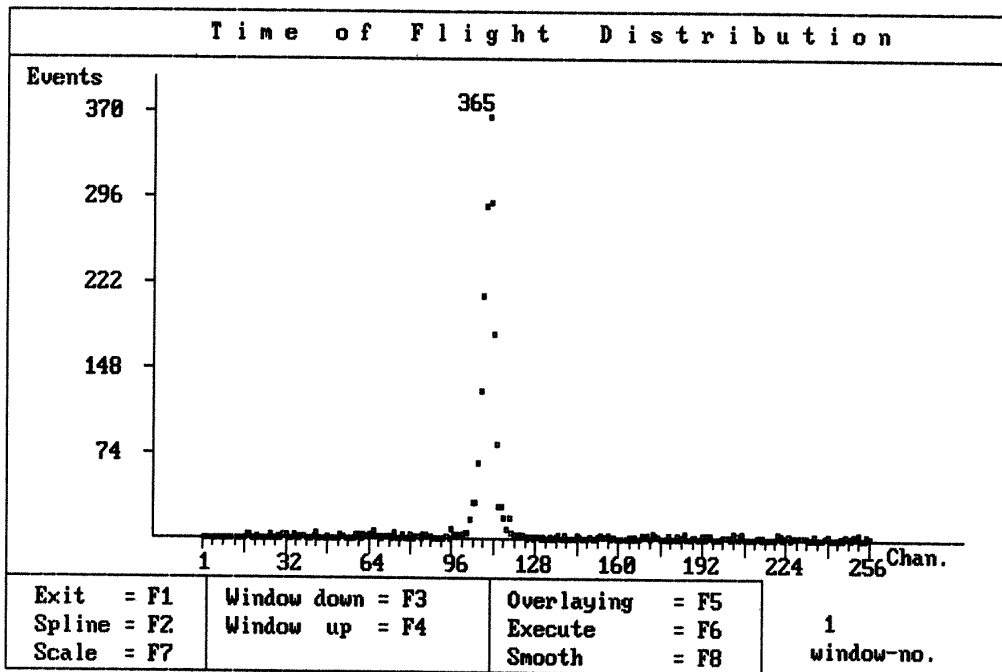


(a) File 作成と初期条件設定

```

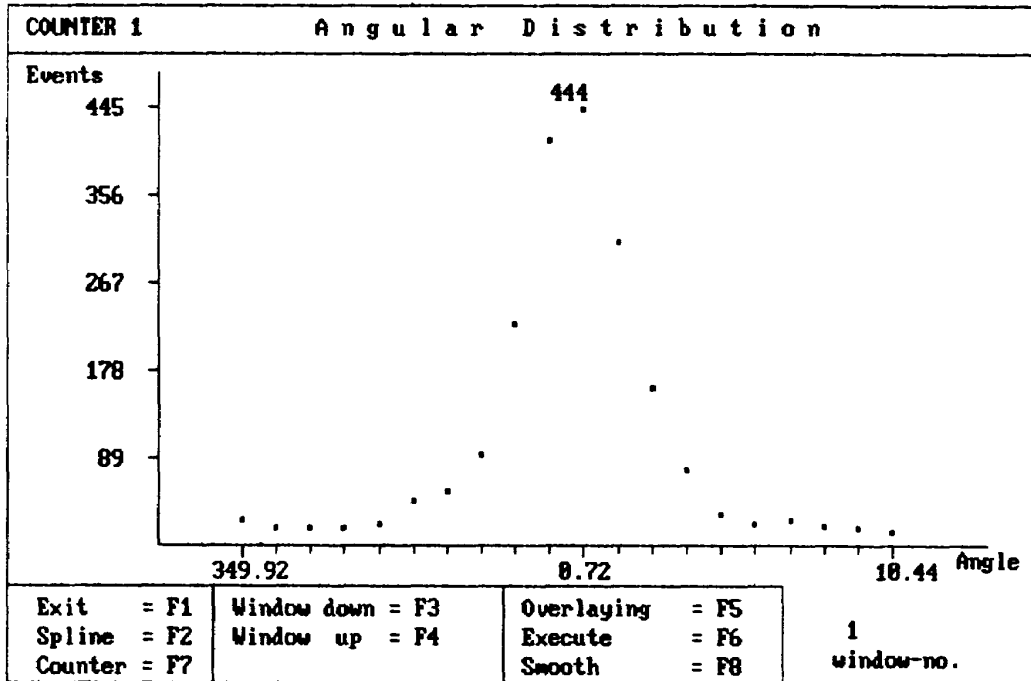
=====
Filename : CAL5-12 .TDA                               21.12.1988           7:38:48
Label : TUNNEL                                         Operator : TAKAGI
MN ERROR      CQ          AQ          TPAR          TSEK          3D-FHI
  A  T      (M/S)        (DEG)          (%)          (%)          (DEG)
-----
1  R          11.50          358.70          1.98          2.24
      (+- 0.01)      (+- 0.03)      (+- 0.03)      (+- 0.04)
=====
    
```

(b) 測定結果一覧表

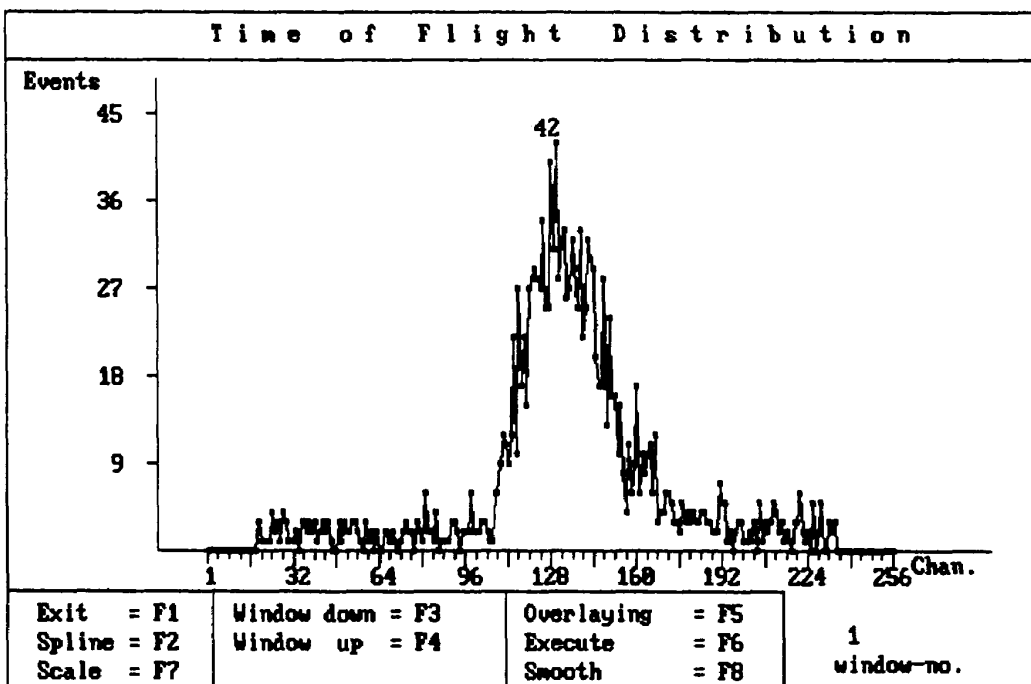


(c) 小型風洞中心における TOF 分布

図 18 表示図面のハードコピー例



(d) 小型風洞中心における Angular 分布



(e) 円柱後流中心における TOF 分布

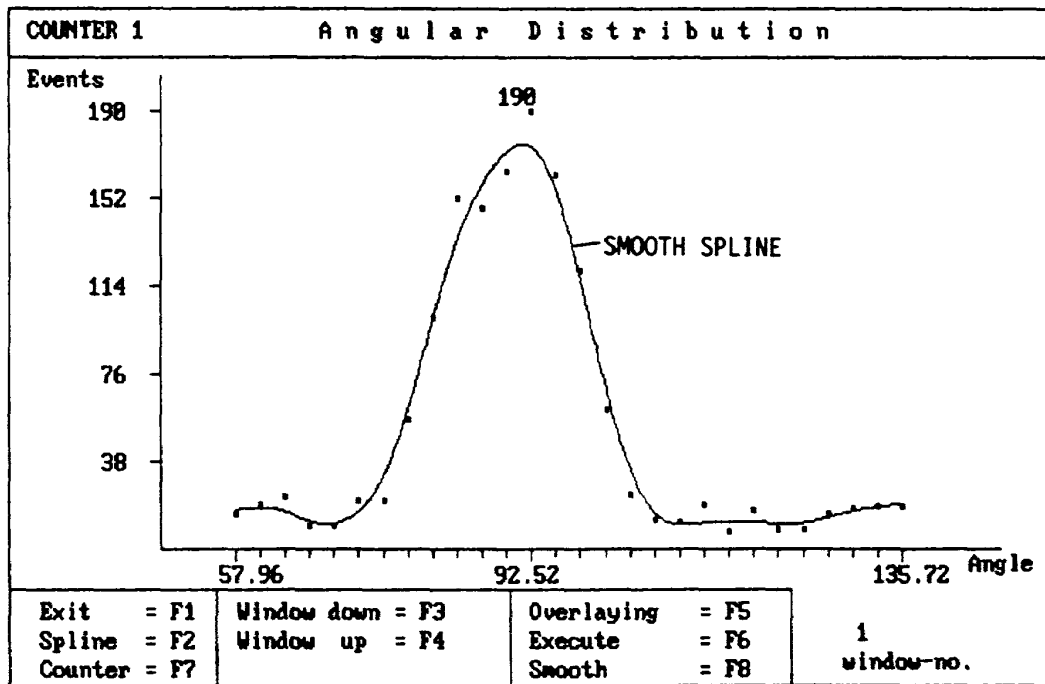
図 18 表示図面のハードコピー例

流に関する詳細はそれぞれ図 23 と 24 及び図 21 と 31 を参照されたい。

図 18 (c)と(e)は TOF 分布を示し、その横軸は 256 (8 ビット) 等分され、256 は設定したゲート時間に対応する。図 18 (d)と(f)は Angular 分布を、その横軸はビーム回転角を示し、その初期ビーム角、ステップ角及びステップ数は図 18 (a)で初

期設定される。図 18 (c)~(f)の縦軸は検出した粒子数を示す。

噴流中心と円柱後流中心における主流方向の乱れ強度比はおおよそ 1 : 8 であり、乱れが大きくなると TOF と Angular 分布の幅は広がり、分布各点の粒子数が減少する。図 18 (d)と(f)の Angular 分布の比較から分かるように、流れ角の大きさに



(f) 円柱後流中心における Angular 分布

図 18 表示画面のハードコピー例

応じてビーム回転角とそのステップ数を設定しなければならない。

乱れが大きくなるにつれて、2本のレーザビームを同一粒子が通過する確率 P_{succ} (図 10 参照) は小さくなり、測定に時間がかかる。例えば図 18 で用いたビーム径とビーム間隔の比が $18/265$ の光学ヘッドでは、噴流の乱れ強度が 1.3% で円柱後流のそれが 10% であることから、通過確率の比は約 3 : 1 となって、ビーム回転ステップ数が同じであるなら、円柱後流測定の方が自由噴流に比べて 3 倍測定に時間がかかることになる。

図 18 (e) にはデータを忠実につらねる Spline 曲線や、図 18 (f) にはデータを滑らかに結ぶ Smooth Spline 曲線が図示されているが、これらの曲線はボタン 1 つの操作で描くことができ、流れ角や分布の広がり等が読み易くなっている。またデータの S/N 比を改善するために、TOF COUNTER UNIT 内の WINDOW 機能を用いて、空中に浮遊する粒子、模型表面や測定窓等からの散乱や光電子増倍管の電気雑音に由来する無相関粒子 (ノイズ) を排除することができる。図 18 (e) はゲート時間の 256 分割のうち下限から 18 等分、上限から 21 等分のデータを排除 (Masking) した例を示

している。

以上示した TOF と Angular 分布の各数値を閲覧し、プリンタに印字することができる。しかしソフトウェアの内容が非公開であるために、測定結果等を編集することや再計算は今のところできない。

3.5 微粒子発生装置

L2F 流速計は焦光度の高いレーザ光を用いているために、後述するように自然に浮遊する微粒子でも、流速測定は可能である。しかし計測時間の短縮や精度向上のためには、通常の風洞計測にはシーディングは不可欠である。このために本システムには Polytec 社の微粒子発生装置が導入されている。

本発生装置にはパラフィンとその溶剤としてトリクロロエチレンが推奨され、1 : 3 ~ 1 : 4 の混合比がよいとされている。発生装置の特性である発生個数に対する発生粒子径との関係を図 19 に示す。

回流式風洞における人工的な微粒子供給方法として、測定部模型上流のノズルから、測定部上流の変流板後縁から、あるいは送風機はやや上流か

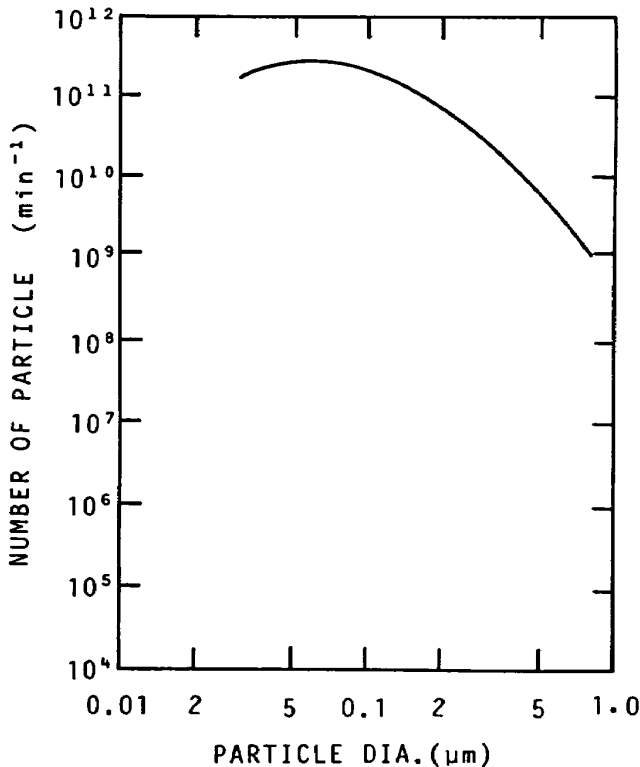


図19 微粒子発生装置特性

ら行なう方法がある。測定には空間的に均一な粒子濃度が要求されるので、ここでは回流式風洞の特色を生かして送風機上流から供給する方法を採った。その供給位置を図21に示した。なお微粒子発生装置で発生した粒子は、圧縮機で送風機上流の風路内に送り込まれる。

3.6 三次元トラバース装置

風洞計測には測定点の移動は不可欠であるが、L2F流速計は後方散乱方式であるために、光学ヘッドのみ移動すればよい。このために三方向に移動可能なトラバース装置が導入されている。後方散乱方式は光学ヘッドの機械的振動にあまり影響されないことから、この装置には特に耐振対策

を施していない。光学ヘッドの移動はGP-IBを介して、L2F流速計流速測定ソフトウェアに組込まれたプログラムによって管理されている。また手動による移動も可能となっている。移動範囲は流れ方向に1,000mm、それと直角水平方向及び鉛直方向に500mmで、いずれの方向にも最小移動量は0.005mm、精度は0.01mmである。

3.7 光学調整器

L2F流速計の2本のビーム間隔は流速計測定値の精度を左右するために、測定前にはあらかじめ正確に測定しておかなければならない。

本システム納入時には、表Ⅲに示したように各レンズのビーム間隔は測定ずみであるが、光学ヘッドの調整等によってその間隔は変わるので、その調整後には測定しておいた方がよい。このための測定光学キットが付属品として用意されている。

このキットは、図20に示すようにビーム焦点位置に目盛付ガラス板を立てて、その目盛を光軸と垂直な壁に投影して、その目盛から2つの最も輝度の高い（ビーム光軸）間隔を測ろうとするものである。目盛間隔は10μmで、1μmの桁は補間で読み取る。馴ればビーム径も読み取れる。この方法の他にも、光の干渉を利用する方法^[4]、熱線風速計を用いる方法^[5]、あるいはビームスキャン法^[6]等が知られている。

なおこの光学レンズ部はスライド式ステージA及びBで光軸方向に微細移動できる。

3.8 その他付属品

光学系の調整やシステムの不良点検等のために、Filter/Discriminatorユニットに信号モニタ端

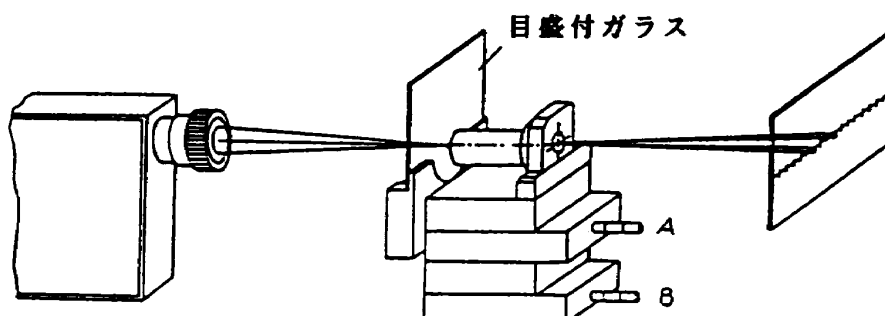


図20 ビーム間隔・ビーム径測定キットと測定法

子が用意されている。このモニタのために高帯域(350MHz)オシロスコープとポラロイドカメラとフードが用意されている。この他目の保護のために、保護用ゴーグルが2個用意されている。

4. 校正風洞

4.1 L2F 流速計用小型低乱風洞校正

小型低乱校正風洞はL2F流速計の校正装置として、1988年3月に完成した。その平面図を図

21に、その基本仕様を表IVに示す。風路は回流式で、37kWのDCモータで駆動される。モータ及び回流流路の大部分は建物の外に設置された。これは風洞全体を建物内に設置すると、測定部周辺が狭くなり、L2F流速計の長焦点レンズ及びそのトラバース装置が設置できなくなることを考慮して行ったものである。

絞り比9の縮流筒は、断面幅550mm、入口高さ650mm、出口高さ662mm、長さ1.5mの測定

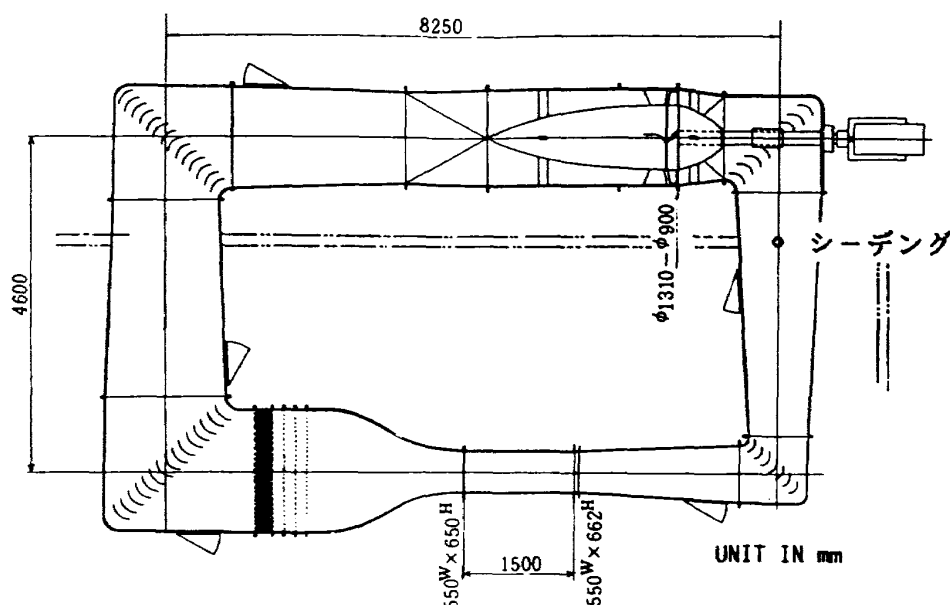


図21 L2F流速計用小型低乱校正風洞

表IV L2F流速計用小型低乱校正風洞の基本仕様

風路	
型式	単路回流式
集合筒金網	20メッシュ、開口比60.8%ステンレス網5枚
縮流筒絞り比	9:1
整流格子	1辺26mmの六角形、長さ200mm、板厚0.1mmステンレス
測定部	入口幅550mm×高さ650mm、出口幅550mm×高さ662mm、長さ1.5m
測定部風速	1m/S~65m/S
風速分布一様性	±0.1% (境界層を除く)
変動乱れ強度	0.05% (風速30m/Sにおいて)
送風機	
型式	1段軸流
直径	1.3m
回転数	0~1,300RPM
動翼数	12枚
後置静翼数	13枚
駆動方式	直流電動機(37kW)直結方式

部になめらかに接続されている。測定部の両側面はレーザー光が透過し易い透明アクリル板を用いた。その厚みはおよそ 15mm である。

測定部における平均流速は 1 m/S から最大 65 m/S まで連続可変である。流速一様性は境界層を除いて $\pm 0.1\%$ である。一方主流乱れ強度は主流によってゆるやかな増加傾向を示すが 30m/S における乱れ強度は音波性圧力変動も含めると主流速度に対しおよそ 0.05% である。なおこの校正風洞の乱れ変動の詳細については文献 [7] を参照されたい。L2F 流速計のシーディング剤は十分に拡散されるよう、送風機上流の流路天井から注入される。L2F 流速計を用いて得られた結果を評価するために、熱線風速計の測定結果と比較した。熱線プローブは測定部天井に設置された三次元トラバース装置で流れ方向及び鉛直方向にマイクロコンピュータ制御で移動可能である。主流の平均流速測定には MKS の圧力変換器モデル 195 を用いた。その測定レンジは 100 Torr (13332 Pascal) である。

4.2 L2F 流速計用トレーサ実験装置 (煙風洞)

L2F 流速計の焦点は集光度が高く、流体中に浮遊している粒子からの散乱光を後方からでも充分検出でき、流体速度を推定できる。しかし微粒子は通常大気中に $0.1 \sim 1 \text{ mm}^{-3}$ 程度しか浮遊していないために、測定に時間がかかるだけでなく、粒子径が不均一であるために発生する光学的雑音の影響を受け易くなる。そこで人為的に粒子径が均一で定濃度の散乱粒子を供給することによって、測定時間の短縮と測定精度の向上が図れる。このために本システムではすでに述べたように微粒子発生装置が導入されているが、この一台で多種多様な風洞計測に充分対応できる訳ではなく、各種実験に応じて最適なシーディング粒子及びシーディング方法を選ぶ必要がある。このような観点からシーディングすなわちトレーサのための実験装置が新たに建設された。

本報告ではこの装置を用いた L2F 流速計の校正を行っていないが、今後のためにその概要について触れておく。この装置の平面及び正面図を図 22 に、基本仕様を表 V に示す。この装置構成はいわゆる風洞そのものであるが、レーザ流速計の校正用にいくつかの工夫をこらしてある。シーデ

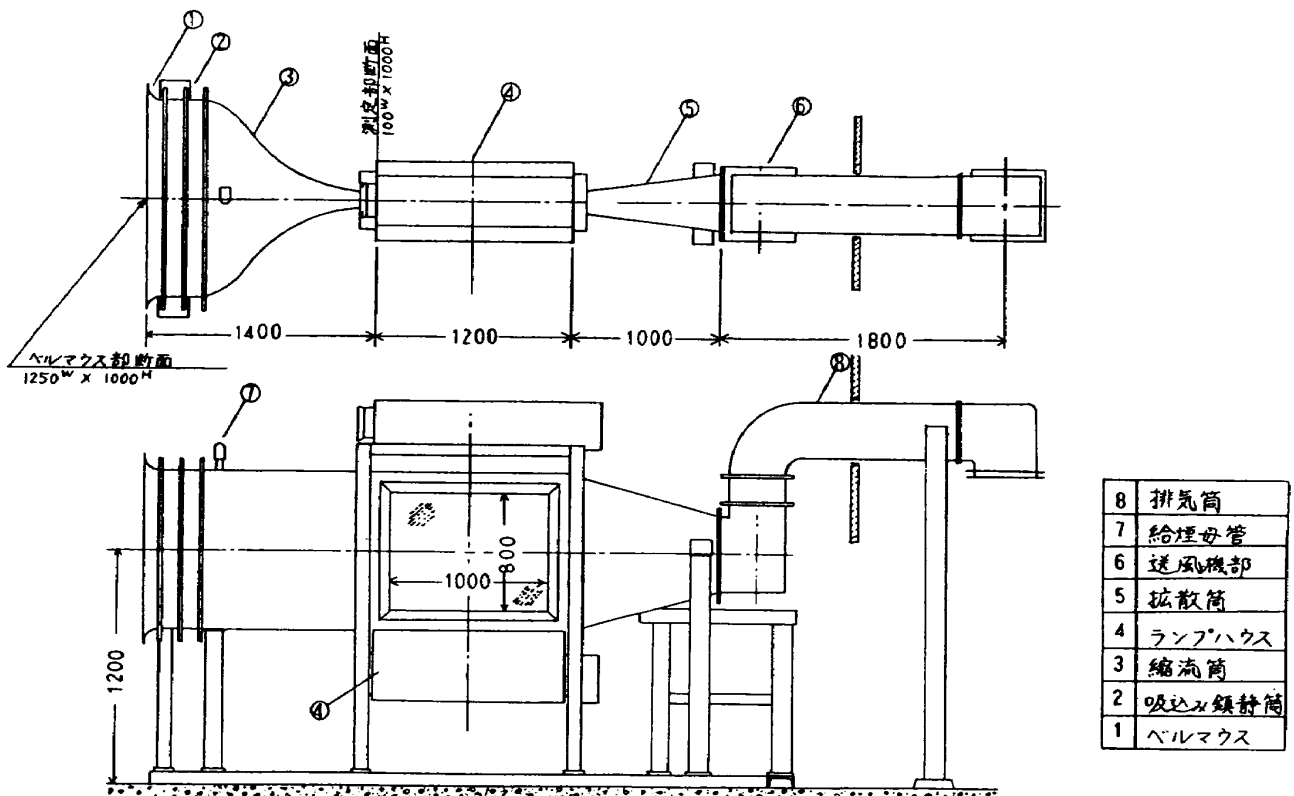


図 22 L2F 流速計用トレーサ実験装置 (煙風洞)

表V L2F 流速計用トレーサ実験装置の基本仕様

風路	
型式	単路吸込方式
集合筒金網	40メッシュ ステンレス網3枚
縮流筒絞り比	二次元絞り 12.5 : 1
測定部	幅100mm, 高さ1,000mm, 長さ1,200mm
測定部中心風速	1m/S~30m/S
送風機	
型式	遠心力型 (Sirocco)
回転数	0~1,600RPM
駆動方式	直流電動機 (7.5kW) ベルト掛

ング剤を容易に注入できるよう、吸込方式がとられ、大気に放出している。シーディング剤は集合筒鉛直中央に導入した二次翼の上端⑦より注入し、その後縁ノズルより流体中に放出する。

中央ノズル20本は20mm間隔で、これをはさんで上下6本ずつは30mm間隔となっている。集合筒②にはメッシュ40、線径0.193mmのステンレス金網3枚が張られ、二次元絞り（絞り比12.5）③を経て、幅100mm、高さ1m、長さ1.2mの測定部に滑らかに接続されている。測定部側壁の1つにはレーザ光を入射できるよう長さ1m、高さ0.8mの透明ガラス板がはめ込まれている。もう一方の側壁には模型を固定及び回転するための直径300mmの円板が用意され、手動で模型迎角を360°の範囲で変えることができる。また測定部上下面には二次元的に流れを観察できるよう、幅20mmのスリット光源④が設置され、煙風洞としても使用可能となっている。

4.3 小型校正風洞

自由噴流の流れ場を作るために図23に示すような小型校正風洞を用いた。

吹口は40mm×40mmの正方形で、80mm×80mmのフランジを有す。乱れの低減と一様性改善のために、30メッシュの金網3枚が集合筒に用いられ、縮流筒は絞り比6.25である。送風機は遠心力押込型のシロッコファンで、モータにはAC交流モータ（AC100V, 30W）が用いられた。したがって吹口における風速は一定で、約10m/S、このとき吹口付近の流速一様性は約±2%、主流及び横方向の乱れ強度は約1.2%及び0.55%であった。

また低速流を作るために、ACモータは交流変圧機に接続し、モータ回転数を可変した。このことによって吹口中心における最低風速は約1.4m/Sまで実現でき、再現性も良好であった。平均流速はピトー静圧管で測定し、モータ供給電圧と

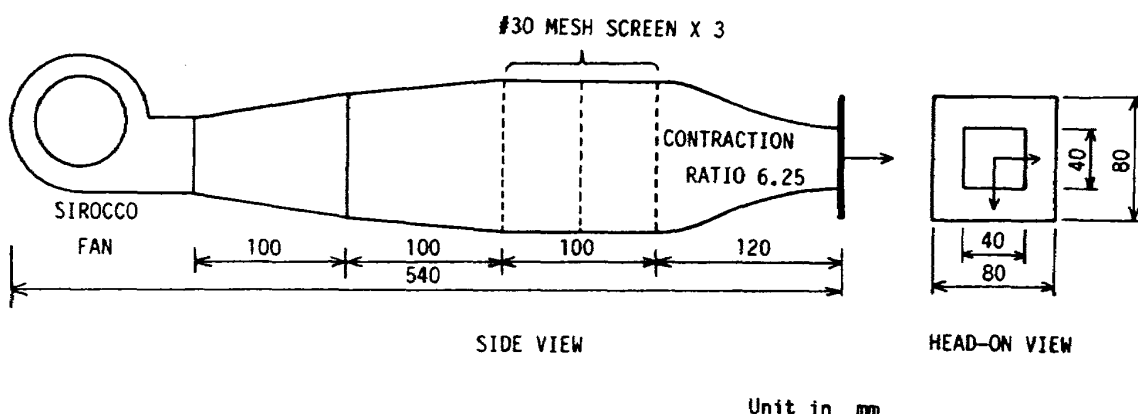


図23 小型校正風洞

の関係をおおき校正しておき、熱線風速計の校正に用いた。

4.4 熱線プローブ

熱線風速計の熱線として、主流平均流速 U と乱れ強度 u' を計測するために I 型プローブ (DANTEC 55 P 01) 及びその直角方向の流速 (ここでは平均流速 V と変動 v 成分) 測定には 45° 傾斜プローブ (DANTEC 55 P 02) を主流を中心に回転させるものとする。熱線の加熱度はいずれのプローブも 0.6 とした。

I 型プローブと傾斜プローブを用いたときの風速計出力の平均値を V_0 , V_+ 及び V_- とし、その変動成分をそれぞれ v_0 , v_+ 及び v_- とする。ここに添字 + と - は主流に対し傾斜プローブが θ と $-\theta$ 傾いた場合を示すものとし、 $\theta = 45^\circ$ とせず一般性をもたせるものとする。さて流速に対する風速計出力の関係は

$$V_0 + v_0 = a(U + u) \quad (14)$$

$$V_+ + v_+ = b\{(U + u) \cos \theta + (V + v) \sin \theta\} \quad (15)$$

$$\text{及び } V_- + v_- = b\{(U + u) \cos \theta - (V + v) \sin \theta\} \quad (16)$$

である。 a 及び b を校正によって求め、 $(\bar{\quad})$ は時間平均を示すものとする

$$U = \bar{V}_0 / a \text{ あるいは } (\bar{V}_+ + \bar{V}_-) / 2a \cos \theta \quad (17)$$

$$V = (\bar{V}_+ - \bar{V}_-) / 2b \sin \theta \quad (18)$$

となり、 $(\bar{\quad})$ は変動成分の実効値を示すものとする、定義より $u' = \sqrt{\bar{u}^2}$, $v' = \sqrt{\bar{v}^2}$ を用いて

$$\bar{v}_0^2 = a^2(\bar{u}^2) = a^2(u')^2 \quad (19)$$

$$\bar{v}_+^2 = b^2(\bar{u}^2 \cos^2 \theta + \bar{v}^2 \sin^2 \theta + \bar{u}\bar{v} \sin 2\theta) \quad (20)$$

及び $\bar{v}_-^2 = b^2(\bar{u}^2 \cos^2 \theta + \bar{v}^2 \sin^2 \theta - \bar{u}\bar{v} \sin 2\theta)$ (21) となるから

$$\bar{v}_+^2 + \bar{v}_-^2 = 2b^2(\bar{u}^2 \cos^2 \theta + \bar{v}^2 \sin^2 \theta) \quad (22)$$

となって、(19)式との連立から

$$v' = \sqrt{(\bar{v}_+^2 + \bar{v}_-^2) / 2b^2 - \bar{v}_0^2 / a^2} / \sin \theta \quad (23)$$

と求められる。このように速度変動の実効値は(14)と(23)式より求めることができるが、実際には傾斜プローブの傾斜角 θ は正確には 45° になっていないので、ここでは文献 [8] で報告されている L2F 流速計の平行レーザビームを用いた方法か

ら得られた値を採用する。これらのビームは1つのビームのまわりをもう1つのビームが回転するので、まず傾斜プローブに回転中心となるビームを照射しながらもう1つのビームを回転させる。回転するビームがちょうど熱線に照射されるとき、すなわち2本のビームが熱線に同時に照射されるときビーム回転角を熱線の傾斜角とみなす訳である。この計測によると用いたプローブの傾斜角は $\theta = 43.2^\circ$ であった。詳しくは文献 [8] に述べられている。

5. L2F 流速計の基本予備試験

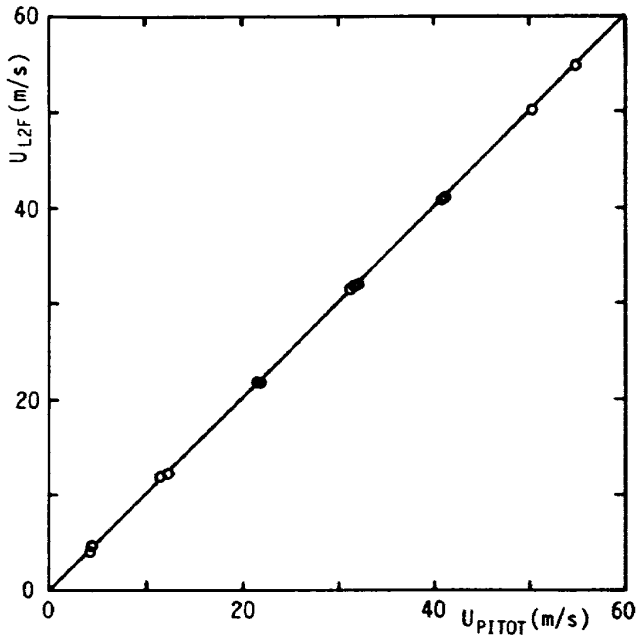
5.1 流速、流れ角及び偏揺角校正

L2F 流速計の測定量として主流方向の平均流速は基本である。この校正のために図 21 と 23 に示した校正風洞を用いた。用いた光学系は焦点距離 500mm の標準レンズである。シーディング剤として図 21 ではパラフィン、図 23 では蚊取線香を用いた。流速検定にピトー静止管を用いた。その結果を図 24 (a) と (b) に示す。校正した流速範囲 $1.4\text{m/S} - 60\text{m/S}$ で、基準流速値とよく一致している。ただ光学系調整によってビーム間隔がずれたために、表 III の $S = 278 \mu\text{m}$ を用いずに、文献 [5] で提案された方法によって再測定された結果 ($S = 265 \mu\text{m}$) をビーム間隔として採用した。なお校正に当っては流速に応じてゲート時間を適当に選択した。例えば流速が 50m/S では $10 \mu\text{S}$, 1.4m/S では $320 \mu\text{S}$ に設定した。

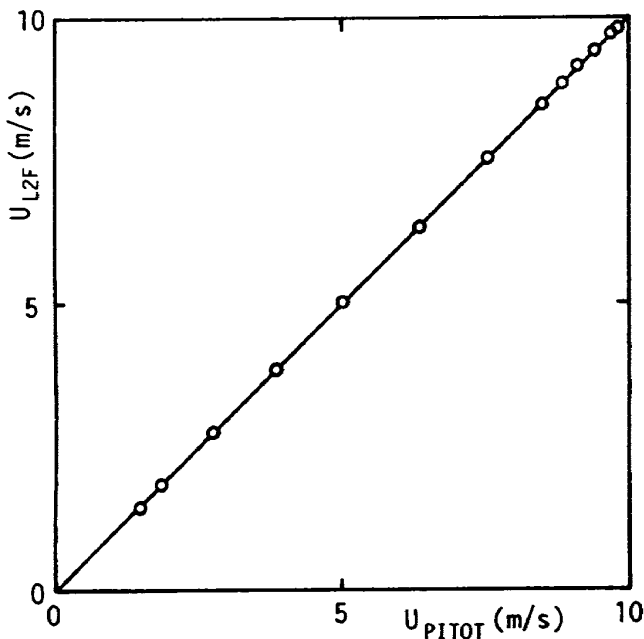
さて L2F 流速計の二次元測定では主流流速の他に流れ角も同時に測定される。この流れ角校正のために、L2F 流速計の測定点を中心に図 23 に示した小型風洞の吹口を鉛直面内で回転できるようにし、その回転角を傾斜計で測定した。

図 25 には主流流速が約 10m/S における流れ角の校正結果を示す。校正した $\pm 20^\circ$ の範囲で測定結果は良好である。

L2F 流速計を用いた二次元測定では、実際の速度ベクトルが三次元的であることに対処するために、焦点は光軸方向にある有限の深度を持つように設計されている。勿論この焦点深度は検出側のレンズ系や検出信号処理法等でも変化するが、



(a) L2F 流速計校正風洞を用いた校正例



(b) 小型校正風洞を用いた校正例
図24 L2F 流速計平均流速校正例

本システムではビーム間隔の約2倍である^[4]。焦点距離500mmの標準レンズでは最小ビーム径18 μ mに対し、ビーム間隔Sが265 μ mであることから、焦点はアスペクト比が1:30の棒状をなしていることがわかる。そこでこのような焦点形状に対し偏揺角特性を調べた。図26は偏揺角(β)に対するL2F流速計標準レンズ系を用いた特性例を示す。予想されるように、 $\beta=0^\circ$ における流速値 $U_{L2F}(0)$ で無次元化した任意の β

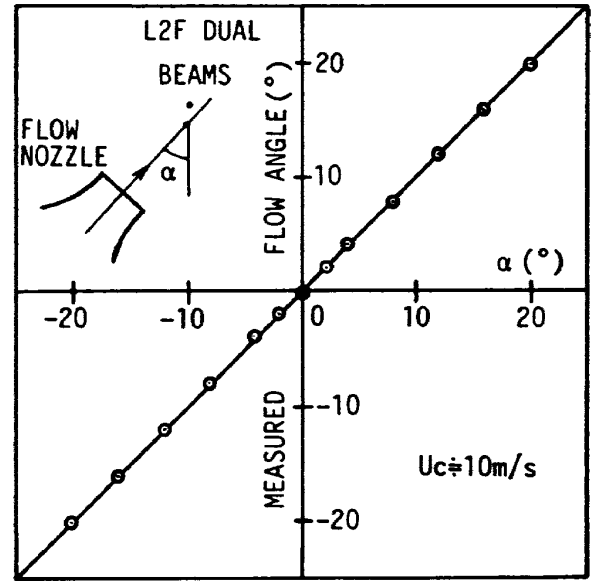


図25 流れ角校正

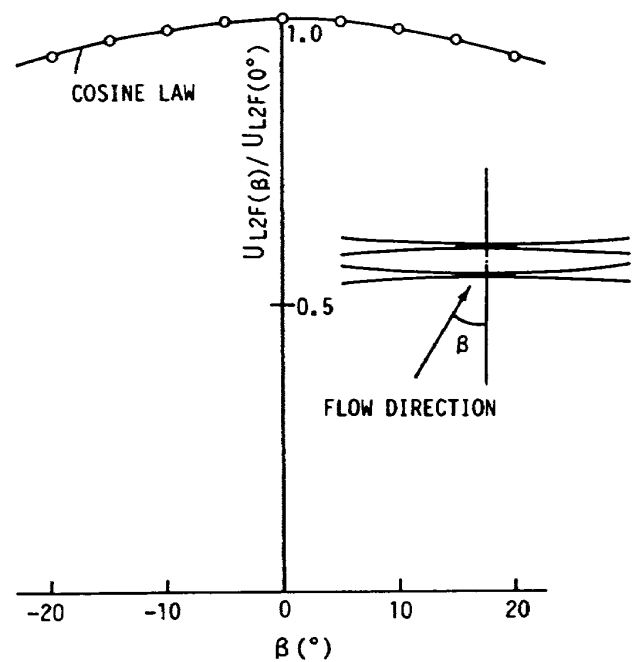


図26 偏揺角校正

に対する流速値 $U_{L2F}(\beta)$ は、余弦法則に従うことがわかる。L2F流速計の測定点がこのような余弦法則に従う性質を用いると、 β を何通りか変えた二次元測定から、三次元速度ベクトルを求めることができる^[2]。

5.2 データレートの設定と測定誤差

L2F流速計を用いて流速測定をする場合、最適なゲート時間の他に、流れ場から散乱して来る散乱光の強度に応じて、最適なデータレートを設

定する必要がある。最適なデータレートはシーディング剤とその濃度及びレーザービーム強度に左右されるために、ある程度経験則に従わざるを得ない。データレートを低く設定すれば、強い散乱光のみを検出するためにいわゆる光学的・電氣的雑音の影響を受けにくくなる反面、測定に時間がかかり、逆に高く設定すれば、前記雑音のために精度よい測定ができなくなる。そこで測定値がデータレートと同時に測定時間の短縮のためにできるだけ高く設定する必要がある。データレートと乱れ強度測定値との関係を調べるために、シーディング剤として蚊取線香を用い、図 23 に示した小型風洞の噴流コア内の低乱流測定を試みた。主流流速 U_c がおよそ 10m/S であるときの結果を図 27 に示す。主流方向の乱れ強度 u' はデータレートにあまり影響を受けずに、設定したデータレートの範囲で 20% 程度変化しているにすぎない。しかし主流と直角方向の乱れ強度 v' はデータレートが 50Hz のとき 0.28%，その後 200Hz まで急激に増加し、そこから 500Hz まではほぼ一定で、600Hz で再び増加し、3.08% となる。データレートが 12 倍変化する間に、 v' は約 11 倍も変化することになる。図 27 には熱線風速計による測定値も比較のために図示してある。L2F 流速計による u' は常に、熱線風速計による結果よりも大きい。この原因を明確にすることができなかった。しかしデータレートにあまり依存しない v' が存在しないこと及び v' がデータレートに大きく影響されてい

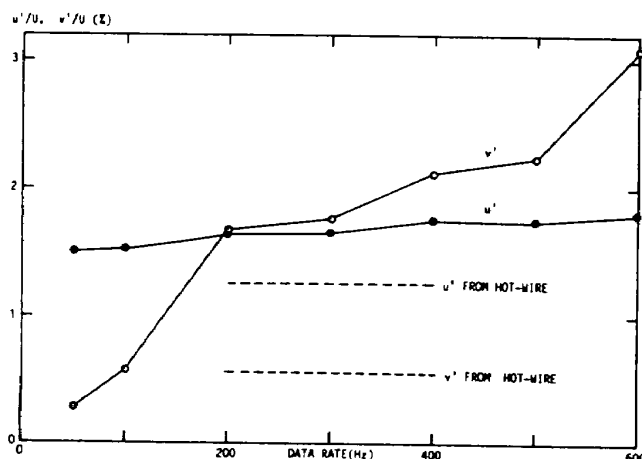


図 27 乱れ測定におけるデータレートの影響

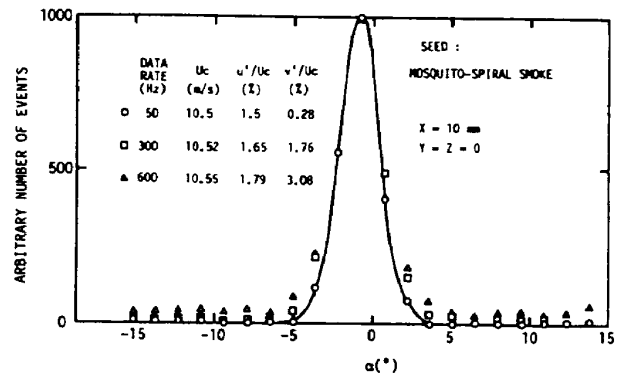


図 28 データレートに対する Angular 分布の変化

る理由についてある程度把握できたので、このことについて以下に述べる。まず 3 つの代表的なデータレート 50, 300 及び 600Hz について、Angular 分布を比較した。その結果を図 28 に示した。データレートを大きくすると Angular 分布の無相関の粒子数が増加し、分布の幅も広がる傾向にある。しかし各分布の無相関粒子数を考慮して、各分布の幅を比較した場合、それらの変化は v' の変化 (図 27 を参照) と比較すると非常に小さいことが分かる。このことはわずかな Angular 分布の違いでも、 v' の値に鋭敏に反影されていることを意味している。そこで v' は誤差補正式 (12) を用いて算出されていることに着目し、この補正式の適用性について次に考える。(12) 式は乱れの等方性を仮定し、導き出されたことはすでに述べた。今熱線風速計から得られた u' と v' の値は正しいとすると、 $u'/v' \approx 2.3$ であり、乱れの等方性は満たされていない。従ってデータレートに無関係な v' が存在しなかったのは、非等方乱流測定に (12) 式を適用したためと考えられる。一方 (12) 式の誤差補正項の大きさは使用したレンズ系では $d/2S = 3.4\%$ であり、熱線風速計から得られた $v'/U = 0.55\%$ と比較すると約 6 倍大きい。

そこでデータレートが 50Hz と 300Hz における補正前の v'_{meas}/U の値を (12) 式に従って求めてみると、それぞれ 3.41% と 3.83% となる。 v'_{meas} の値が約 10% 違っただけでも、補正後の v' は約 6 倍 (図 28 の表より $1.76/0.28$) も変化することが分かる。従って、低乱流測定において v' の測定誤差を小さくするためには、 $d/2S$ と v' との比ができるだけ小さくなるようなレンズ系を用い

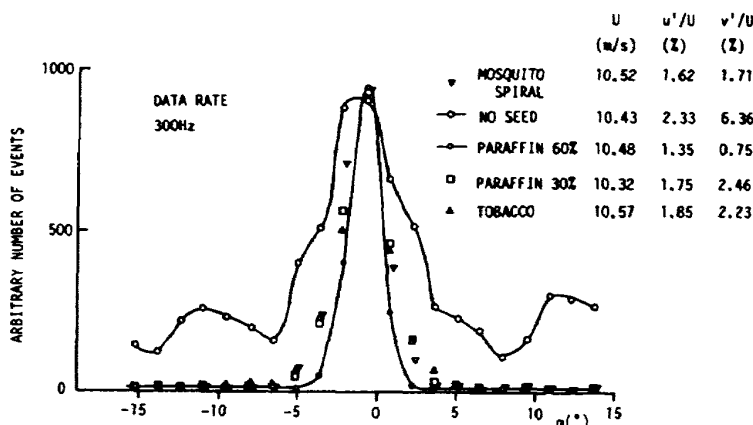


図29 シーディング剤の違いによる Angular 分布の変化

るべきであろう。

次にシーディング剤の効果を調べるために、データレートを300Hzに固定して、Polytec社が推奨するパラフィン30%溶液の他に、倍濃度のパラフィン、蚊取線香及びタバコの煙を用いた。比較のためにシーディング剤を用いない場合についても調べた。すべて流速は約10m/Sで一定とし、結果を図29に示す。またU、 u' 及び v' の値も各シーディング剤に対応させて示してある。60%濃度パラフィンをを用いた場合、流れ角の変化が最も小さく、 u' と v' 共に熱線流速計で得た結果に近い。30%濃度パラフィン、蚊取線香及びタバコの煙については顕著な違いは認められない。この理由として次のことが考えられる。この実験で使用した三種類のシーディング剤の粒径を確認した結果、いずれも1 μ mないしはそれ以下⁽³⁾でほぼ同一の大きさであった。またこの実験では、レーザ光源の強さをはじめ光学系、信号処理系の設定条件を同一にしてデータレートを300Hzに設定した。以上のことから測定点まわりの粒子濃度分布は、三つのシーディング剤についてほぼ同程度に実現されていたためと思われる。

一方シーディング剤を用いないと極端に無相関粒子数が増大すると同時にAngular分布の幅が広がり、結果として v' 測定値が増大する。また主流流速は送風機の回転むらのためにこの測定だけでその精度を評価できないが、シーディング剤を用いないで測定した流れ角はシーディング剤を用いて測定した流れ角に対し約 -0.6° ずれている。この流速計の一般仕様によれば流れ角の測定精度は

0.5°以下となっており、シーディング剤を用いなくとも平均流速測定に関して十分満足のいく測定が可能であることを示している。

なお上記ずれ角(-0.6°)を主流に直角方向の流速に換算すると、主流流速の約1%に対応する。

5.4 測定窓の影響

L2F流速計校正風洞では測定部側壁を通して測定が行われるために、その影響を調べておく必要がある。そこで側壁と同じ厚み(15mm)で同質の透明アクリル板を対物レンズと自由噴流間に挿入して、その効果を調べた。測定値のばらつきによる誤差を小さくするために、同じ測定を数回繰返し、その平均を求めた。その結果を図30に示す。まず図30(a)に示した平均流速はアクリル板によって0.2%程度小さ目に、同図(b)に示した主流方向の乱れ強度 u' はやや大き目に、同図(c)の v' はほぼ同じレベルと言えるが、 v' の測定値のばらつきは増大した。レーザ光がアクリル板を通過する際に、反射や散乱のために透過光の強度は減少し、15mm厚のアクリル板の場合には約15%減衰した。微粒子からの散乱光は再びアクリル板を通して検出されるために、さらに15%減衰する。従って散乱強度を一定にするためには、アクリル板の有無によってレーザパワーを30%程度調整する必要がある。図30はレーザパワーを一定にして測定したものであり、 v' のばらつきはレーザ光の減衰が主たる原因と考えられる。

一方アクリル板によって、レーザ光は入射と通過の際に2度の屈折を受けて焦点距離とビーム間

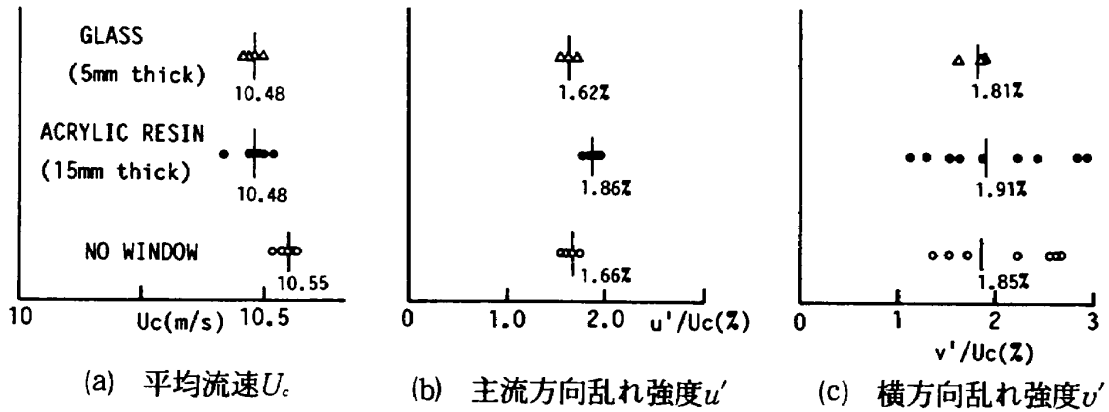


図 30 測定窓の影響

隔は変化する。

前述したようにビーム間隔はアクリル板によって 0.2%程度狭まることがわかったが、焦点距離の変化は文献 [5] に従って測定したところ、約 4.9mm 長くなることが分かった。三次元模型の測定等ではこの焦点距離の変化が無視できない場合もあり得るので、常に留意しておく必要があろう。

6. 実測例

第 5 章で L2F 流速計の特徴及び欠点をほぼ把握できたので、実際の流れ場で実測を行なう。三種類の流れ場すなわち二次元円柱後流、境界層及び自由噴流を対象とした。前者二例は L2F 流速計校正風洞を、自由噴流は小型風洞を用いた。

6.1 二次元円柱後流

測定部入口から下流約 200mm の中央に直径 $d=6\text{ mm}$ のドリルロッドを水平に固定し、一様流速 U_∞ を 30 m/s で一定とした。このとき円柱直径に基づくレイノルズ数は 1.1×10^4 である。後流測定点は円柱中心から下流 $X=30d$ とした。その結果を図 31 に示す。比較のために熱線流速計による結果も図示されている。後流内の平均主流流速分布 U/U_∞ では L2F 流速計による結果の方が全般的に小さ目で、乱れ強度が大きい後流中心ほどその差は大きい傾向にある。しかしその差も 2% 以内で両者は一致している。一方円柱軸と直角方向の平均流速成分を V とすると、そのレベルは低く、ほとんど 0 とみてよい。

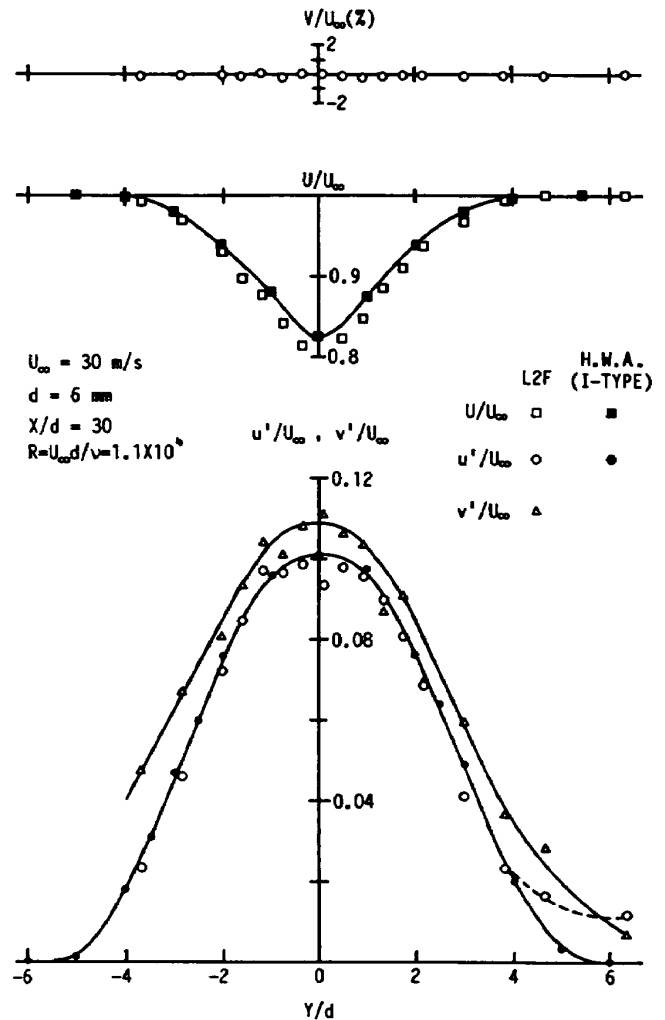


図 31 円柱直径の 30 倍下流における円柱後流における平均流速と乱れ強度分布

一方乱れ強度 u' 分布は、 $Y/d > 4$ の低乱流領域を除いて、熱線流速計による結果とよく一致している。しかし u' の大きさが主流の 2% より小さくなると、L2F 流速計の結果は熱線流速計の結果からずれ始める。一様流中の乱れ強度が主流の 0.05% 程度であることを考慮すると、 $Y/d =$

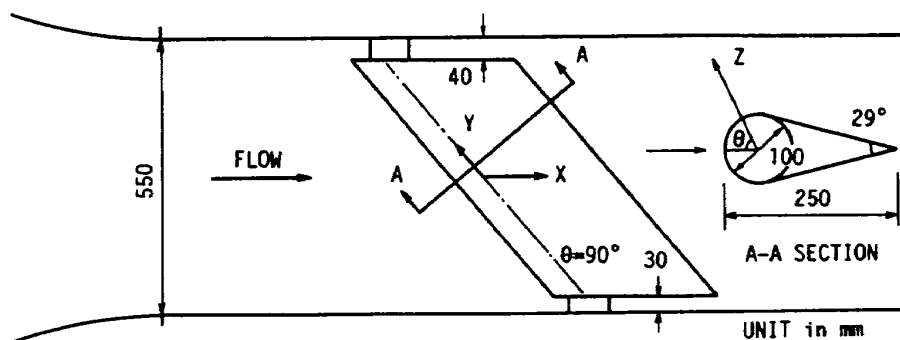


図32 斜め円柱模型

6.3におけるL2F流速計の測定値 $u'/U_\infty = 1.2\%$ の大部分は速度の乱れによるのではなく、L2F流速計の雑音とみなすべきものである。この雑音はL2F流速計のレンズ系、シーディング濃度、データレート及びレーザパワー等に依存すると考えられる。ここで主流流速以外ほぼ測定条件が同じ図30(b)の亚克力板を用いて測定した自由噴流コア内の u' 測定値 ($u'/U_c = 1.86\%$) にも同程度の雑音が含まれていると仮定すると、真の乱れ強度はおよそ1.4%となり、熱線風速計による結果1.25%と約10%の精度で一致する。

v' に関する比較データはないので、熱線風速計を用いた測定を計画している。

6.2 三次元境界層

三次元境界層用模型として、フェアリング付斜め円柱を 50° の後退角で水平に図21に示した風洞測定部に固定した。円柱直径は100mmで、模型の断面形状及び風洞測定部に設置した様子を図32に示す。模型上流から発達している風路内壁上の境界層の影響をできるだけ避けるために、側壁と模型の間に隙間を設けた。

さて後退角のある翼面に発達する境界層は、翼前縁に沿う圧力勾配のために横流れが生じ、主流方向との合成速度ベクトルは境界層内でねじれ、強い三次元性を帯びて、流れは複雑である。従って三次元層流境界層遷移に関する研究は二次元のそれに比べまだ未知の点が多い⁽⁹⁾。このような流れ場に対し、測定には焦点距離500mm光学ヘッドを用い、レーザビームは側壁にほぼ垂直に入射した。図33は一様流速が $U_\infty = 41\text{m/s}$ における

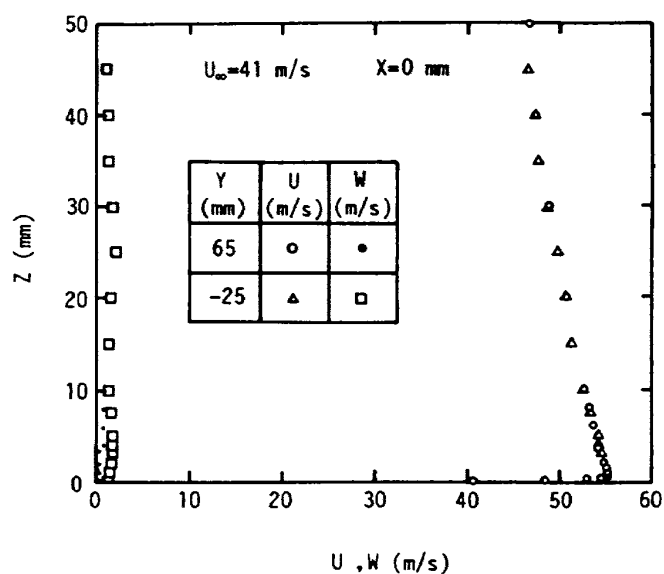


図33 斜め円柱の境回層分布と外層流れ分布

前縁から周方向に $\theta = 90^\circ$ における位置での主流と法線 (Z) 方向の平均流速 U 及び W 分布を示す。流れの二次元性を示すために、風洞横中心 $Y = 0$ に対し2点 ($Y/65\text{mm}$ と -25mm) における分布が比較されている。 U 分布は両者よく一致し、二次元性はよいと言える。三次元境界層は模型表面と最も加速された位置との極薄い領域内に存在する。その厚みはこの分布からだけでは読み取れないが、熱線風速計による結果と照合すると0.35mm程度である。境界層内の流速は模型表面から約0.1mmまで測定可能であった。

W 成分は常に正符号であることから、流速は模型表面に沿わずに水平軸より一様流方向に曲げられていることが分かる。しかしその角度は小さく、最大でも一様流速の約4%、すなわち水平軸から約 2.3° にすぎない。模型表面からおよそ10mmまでの領域で、 W 成分は両者一致していな

いが、この理由として次のような解釈が可能と思われる。三次元境界層では横流れ不安定によって定在的な縦渦列が形成される。これらの縦渦はほぼ主流方向を軸として、すべて時計回りである。これらの事実から、 $Y = -25\text{mm}$ では縦渦の壁から外向きの領域が、一方 $Y = 60\text{mm}$ では縦渦の中心領域が対応しているのではないかと考えられる。しかし境界層内に形成される縦渦列が、境界層厚の 30 倍もの高さまで影響を及ぼすのかどうか上記解釈に疑問も残り、今後さらに詳しい測定が必要である。

さて二次元 L2F 流速計を用いて、模型表面から約 0.1mm まで測定可能であったのは、この流速計の焦点ボリューム（測定点の大きさ）の模型表面、垂直方向（Z 方向）の長さが少なくとも 0.1mm 以下であったからである。これを二次元測定でよく用いられる汎用 X 型熱線の大きさと比べると $1/5$ 以下である。しかし L2F 流速計のビームは回転するために、焦点ボリュームの Z 方向の長さは流れに存在する乱れの大きさによって変化する。Z 方向のその長さはビーム間隔を S 、水平からのビーム回転角を α （図 3 参照）とすると、 $\pm S \cdot \sin \alpha$ となる。前縁から $\theta = 90^\circ$ における境界層はまだ層流で速度変動は小さく、ビームの回転角 α は $\pm 10^\circ$ 以内であったことから、焦点ボリュームの Z 方向の長さは $\pm 0.27 \sin 10^\circ \approx \pm 0.05\text{mm}$ （本測定で用いたレンズ系では $S = 0.27\text{mm}$ ）となり、壁から 0.1mm までは測定可能であることが分かる。なお模型表面からの光散乱を防止するために、つや消し黒色塗料をその表面に塗布した。

この境界層測定の後判明したことであるが、光学系の調整が不十分で回転の中心となるべきビームが歳差運動をしていた¹⁰⁾。本測定ではビーム回転角が小さく重大な誤差を生むに到らなかったが、速度勾配が急で乱れが大きい流れ場における流速測定では、その測定誤差の原因となるので早急な調整が必要である。

図 33 には模型表面から $Z = 50\text{mm}$ までの測定データが図示されているが、これらのデータはデータレートをほぼ 300Hz に設定して測定された。しかしこの位置から鉛直上方ではこのデータレ-

ートを維持して測定することは不可能であった。この理由として $Z > 50\text{mm}$ ではシーディング剤が極端に希薄になったためと考えられ、送風機上流からシーディング剤を供給する方法にも問題があることが分かった。

6.3 自由噴流

自由噴流は静止流体と接するために精度よい測定は難しい。これは噴流が静止流体を巻き込む（Entrainment あるいは Encroachment）ために、噴流の裾領域では速度が低いことと相俟って、流れの方向の大きな変化と大きな速度変動を伴うからである。そこで L2F 流速計がこのような流れ場測定にどの程度適用できるかを調べた。

自由噴流を作るために、図 23 に示した小型風洞を用いた。その吹口は正方形で二次元噴流と言い難いが、流速及び乱れの強度が一様なコア領域が主流（X 軸方向）と直角方向（Y 軸方向）に十分長く存在するならば、この流れ場を二次元噴流とみなしてよい。そこで吹口の一辺の長さを L （ $=40\text{mm}$ ）として、吹口から下流に $X/L = 1.0$ の位置で噴流中心（ $Z = 0$ ）を通り、Y 方向に沿って平均流速と乱れ強度を測定した。測定の前に $X/L = 1.0$ の $Z = \pm 5\text{mm}$ の 2 点で、Y 方向に主流流速分布を測定し、二次元性が良好であることを確認した。

L2F 流速計のレンズ系のビーム径、ビーム間隔はそれぞれ $18\mu\text{m}$ 、 $265\mu\text{m}$ 、焦点距離は 500mm で、レーザーパワーは 1W とした。シーディング剤として蚊取線香を用いた。

噴流中心流速 U_c で無次元化した測定結果を図 34 に示す。図にはピトー静圧管と熱線風速計による結果も比較のために示した。熱線風速計のセンサとして主流方向の流速は I 型、Y 方向の流速は傾斜型の熱線をそれぞれ用いた。

噴流中心部の $-0.25 < Y/L < 0.25$ には平均流速 U （X 方向）と V （Y 方向）分布及びこれらの方向に対応した乱れ強度 u' と v' 分布がほぼ一様であるコア領域が存在することが分かる。従って $X/L = 1.0$ における流れ場をまだ二次元とみなしてよさそうである。このコア領域内には風洞固有

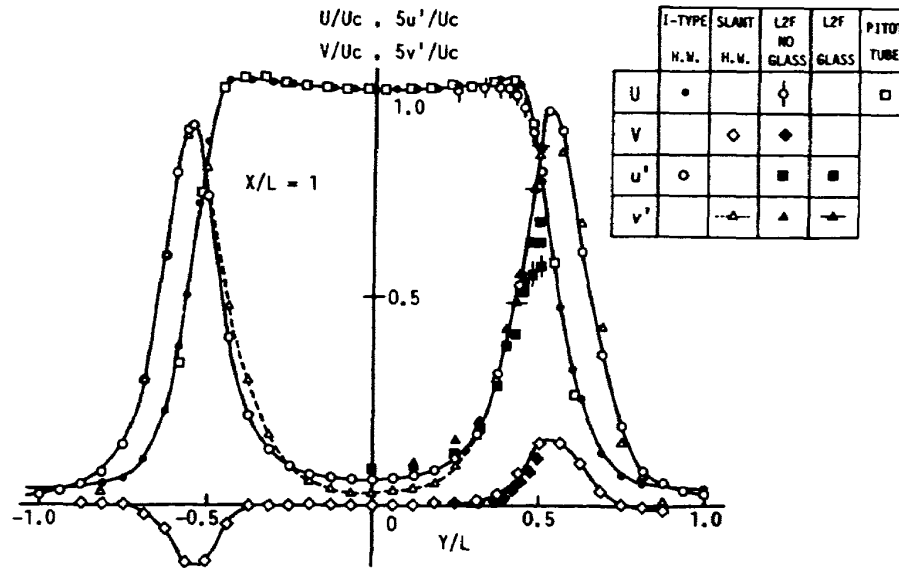


図34 $X/L=1.0$ における自由噴流における平均流速と乱れ強度分布

の非等方的な乱れが残留しているが、新しい乱れが作られている $Y > 0.3$ では乱れは等方的である。

U 分布について、ピトー静圧管と熱線流速計の結果はよく一致しているが、この両者に対して $0.3 < Y/L < 0.5$ の範囲で L2F 流速計の結果はやや低い。この傾向は円柱後流中心部でもみられ、その原因は今のところ不明である。 V 分布は傾斜型熱線を用いた結果とよく一致している。

X 及び Y 方向の乱れ強度 u' と v' が熱線流速計による結果とよく一致するのは $0.25 < Y/L < 0.45$ の狭い領域に限られている。乱れ強度 u' が主流流速の約 2% となる $Y/L=0.25$ から噴流中心部では、L2F 流速計の結果は熱線流速計のそれより大きい。この傾向は円柱後流外縁部でも同様であった。 $0 < Y/L < 0.25$ の低乱流場で L2F 流速計による v' が熱線流速計による結果と一致しなくなるのは、乱れが等方的でないにもかかわらず乱れの等方性を仮定して得られた補正式を適用したためである。

二次元 L2F 流速計は一回の測定で乱れ強度に関し u' と v' を同時に求めることができるが、次のような場合は v' は計算されない。Angular 分布の左右の裾が十分にないもの及び Angular 分布としてデータのばらつきが大きく、統計的には不十分な分布と診断された場合である。 $0.45 < Y/L < 0.5$ において、 u' と対で測定されるはずの v' が図示されていないデータもあるが、これは上

記理由のうちどちらかであった。

厚さ 15mm のアクリル板の効果もこの領域で調べられ、例えばアクリル板を通した測定では、熱線流速計の結果と比較すると v' はよく一致している反面、 u' は 25%~30% も小さ目である。アクリル板を用いない計測では、 u' は熱線流速計の結果に近いものの、 v' は計算されなかった。このように局所乱れ強度が約 $u'/U \cong v'/U = 0.12$ より大きい領域で満足のいく二次元測定ができなかった理由として、噴流はシーディング剤が希薄な静止流体を巻き込むために、データレートを一定にできなかったことが挙げられる。以上の結果をまとめると次のようである。

本結果からアクリル板の効果と本レンズ系の乱れ測定の限界値を明確に示すことができなかった。平均流速は局所乱れ約 $u'/U = 0.2$ である $Y/L = 0.5$ まで測定できたが、精度よい乱れ測定のためにはシーディングの安定供給は重要である。

また乱れ強度に応じて最適なレンズ系を選ぶ必要があり、今後の課題としたい。

7. 結 論

本報告書の前半では、導入した光ファイバ式三次元レーザ2焦点流速計の測定原理及びその装置の概要について、今回は特に二次元測定に限定して述べた。後半では、二次元 L2F 流速計を風洞測定に使用するための基本予備試験として、速度

ベクトル校正試験, 測定窓の効果及びデータレートとシーディングとの関係等について調べた。さらにこの流速計を用いて円柱後流, 層流境界層及び自由噴流を測定した。その結果次のような結論を得た。

- 1) L2F 流速計で測定した平均流速は校正した $1.4\text{m/S} - 60\text{m/S}$ の範囲で基準流速値とよく一致した。流れ角と偏揺角特性も校正し, 良好な結果が得られた。
- 2) その結果, 二次元 L2F 流速計は校正なしで二次元流速測定は可能である。
- 3) 自然に浮遊する微粒子でも平均流速測定は可能であったが, 乱れ強度の測定誤差は増大した。
- 4) しかしシーディング剤を用いることによって測定時間の短縮と乱れ強度だけでなく, 平均流速についても測定精度の向上が図れた。
- 5) 回流式風洞では送風機上流からシーディング剤を供給したが, 円柱後流測定に支障は生じなかった。しかし層流境界層測定ではシーディングが希薄になり, 測定できない領域があった。
- 6) 主流流速の約 2%~12% 乱流場における焦点距離 500mm, ビーム径 $18\mu\text{m}$ 及びビーム間隔 $265\mu\text{m}$ を有するレンズ系を用いた二次元測定では, 熱線風速計による結果とよく一致した。
- 7) しかし 2% 以下の低乱流測定ではデータレートの設定が測定精度に重要な意味をなし, 特に主流に直角方向の乱れ強度はその設定値に大きく左右された。
- 8) 一方 12% 以上の乱流測定において, データレートを一定に保てなかったために十分な精度では測定不可能であった。しかし平均流速は 20% の乱流場まで測定可能であった。
- 9) 主流に直角方向の乱れ強度に対する誤差補正式 (12) は非等方性乱流場に適用できない。
- 10) 層流境界層測定において, 壁面から約 0.1mm まで測定可能であった。
- 11) 自由噴流の外縁 (噴流吹口より外側) ではシーディング剤が希薄になることと高乱流のために

測定不可能であった。

- 12) 測定窓の影響として, ビームパワーが減衰し, 焦点距離が変わる。測定窓として厚さ 15mm のアクリル板を用いると, ビームパワーは 15% 減衰し, 焦点距離 500mm のレンズ系ではその距離は約 5mm 長くなる。

最後に, L2F 流速計の応用範囲をさらに広げるためには, 高乱流測定技術の確立は不可欠である。そのためには, d/S が可変の Amici プリズムを用いた低乱流から高乱流までの測定技術の習得が当面の課題である。

謝 辞

レーザ 2 焦点流速計の装置組立・調整のために, ポリテック社のゼルバツハ博士から甚大なる協力を得た。また計測に当って多くの有益な助言も得た。ここに謝意を表します。流速計の日本代理店レオニックス社の何・清水両氏には導入に当って多くの助言を頂き, 蟻生・鈴木両氏には光学調整やビーム特性計測を心よく引き受けて頂いた。また流速計を用いた際に生じた多くの質問や不明点を, ポリテック社との間に立ってすみやかに処理して頂き, ここに感謝いたします。レーザ流速計用校正風洞ならびに煙風洞を設計・製作した佐野屋鉄工所の関係者には, 風洞設計後でも多くの設計変更によく応じて頂き, ここに感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] Schodl, R. : "A Laser Dual Beam Method for Flow Measurement in Turbomachines", ASME-Paper No.74-GT-157 (1974).
- [2] Schodl, R. : "Laser-Two-Focus Velocimetry", AGARD PEP, 67th Symposium on "Advanced Instrumentation for Aero Engine Components", Philadelphia, May 1986. or See AIAA-88-3034, "A Multi Color Fiber Optic Laser Two Focus Velocimeter for 3-Dimensional Flow Analysis".
- [3] 流体計測法: 日本機械学会編 pp.142-152.
- [4] Polytec 社: L2F-5000 Series Operational

- Manual (1988) .
- [5] 高木正平, 室田勝一: “熱線を用いたレーザ流速計のビーム焦点検出及びビーム特性計測法”, 航技研報告 TR-1043, 1989.
- [6] 平井紀光: “実用レーザ技術” pp.262-263, 共立出版.
- [7] 高木正平: “レーザ流速計校正風洞の残留乱れと騒音及びその評価”航技研報告 TR-1054, 1990.
- [8] 高木正平, 本間正行: “平行レーザビームを用いて傾斜型熱線の傾斜角を測定する方法”, 航技研報告, TR-1078.
- [9] Reed, H. Saric, W.S. : “Stability of Three-Dimensional Boundary Layers”, Annual Review Fluid Mech. Vol. 21, pp. 235-284, 1989.
- [10] 高木正平: “三次元境界層遷移の予備実験”, 第21回乱流シンポジウム講演論文集, pp.81-85 (1989).

航空宇宙技術研究所資料627号

平成2年9月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 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5-6-17
