九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

乱流間欠性研究へのレーザドップラ流速計の応用

高曽，徹
九州大学機能物質科学研究所

西野，友太良
鈴木自動車工業株式会社

妹尾，泰利
三浦工業株式会社

https://doi.org/10.15017/6535

出版情報：九州大学機能物質科学研究所報告. 2 (1), pp.125-142, 1988-06-30. 九州大学機能物質科学研究所
バージョン：
権利関係：

機能物質科学研究所
報告第2巻第1号 p. 125-142
(1988. 6)

乱流間欠性研究へのレーザドップラ流速計の応用

高曽　徹・西野　友太良*・妹尾　泰利**

（本論文を名誉教授柘植乙彦先生に献呈する）

Application of a Laser Doppler Anemometer to the Study on the Nature of Turbulent Intermittency

Toru KOSO, Yutaro NISHINO and Yasutoshi SENOO

A novel method to measure the conditional turbulent zone averages in a fully developed jet is demonstrated. In conventional methods to study the turbulent intermittency, hot wire signals are processed to detect the turbulent zone and then the conditional average velocities are obtained. But this signal processing is cumbersome and difficult to set the threshold of turbulence without ambiguity. In a jet flow, the surrounding non-turbulent fluid is entrained into the turbulent zoze, but the reverse process never occurs. Therefore small particles seeded in the nozzle flow remain only in the turbulent zone. By means of a laser doppler anemometer (LDA), the velocities of these particles are measured, therefore, the turbulent zone averages are obtained directly.

This paper describes an experimental comparison of this method with the conventional one. A circular air jet seeded with DOP particles was blown into a seedless coflowing stream. Then the mean velocities and the turbulent intensities were measured by a LDA processed with a frequency counter, and they were proved to coincide with the values secured by means of conditional average of HWA signals. Furthermore, a seedless jet in a seeded coflowing stream was measured, and the effects of selective seeding on the mean velocities and the turbulent intensities were examined to understand the entrainment and the turbulent mixing process of jet.

1. まえがき

流体機器の開発，設計に際してその流動状況を理解することはその性能，使用範囲を考える上で重要で，実験や数値計算により流れのパターンが調べられている[1]。従来，流れは時間・空間的に均質とみなして時間平均値を計測したり数値予測することが多かったが，近年多くの流れ場において乱流と非乱流が混在し，これらが交互に現れて流動やスカラ輸送に重要な影響を及ぼしていることが明らかになっている[2]。

この乱流と非乱流が不規則に交互に現れる現象を乱流間欠性[1]と言い噴流や乱流境界層の外縁で極めて明瞭に現れる。乱流間欠性は乱流構造を理解するのに重要であるから多くの研究がなされているが，従来，この研究には熱線流速計（HWA）を用い，速度波形を信号処理して乱流・非乱流判別を行って乱流域だけあるいは非乱流域だけの条件付領域平均特性などが測定されてきた[3]。しかし，この乱流・非乱流判別の信号処理は複雑で，多くの手順を要するのでより簡便な方

受理日　昭和63年4月11日
* 鈴木自動車工業(株)
** 三浦工業(株)

法が望まれていた。

そこで本研究では，乱流間欠性流れとして一様平行流中の噴流の十分発達した領域を例にとり，レーザドップラ流速計（LDA）と選択的シーディング（微粒子供給）の手法によって，全く別の原理で乱流域平均特性が簡易に得られることを示し，従来の HWA を用いた実験結果と比較して方法の妥当性を検証した。

本論文では特に，計測処理システム，選択的シーディングの効果，信号処理方法の影響および得られた乱流域平均特性値の誤差について詳述する。

2. LDAによる乱流域平均の測定

2. 1 測定原理[4] 噴流の十分発達したところでは，噴出流体は乱流域にのみ存在するので噴出流のみに選択的にシーディング（微粒子供給）してレーザドップラ流速計（LDA）で測定すれば，乱流域平均速度・乱れ強さが直接測定できる。

つまり，噴流の成長過程においては，もっぱら周囲の非乱流流体が乱流域に取り込まれる（エントレインメント）のみで，その逆はほとんど生じない。それゆ

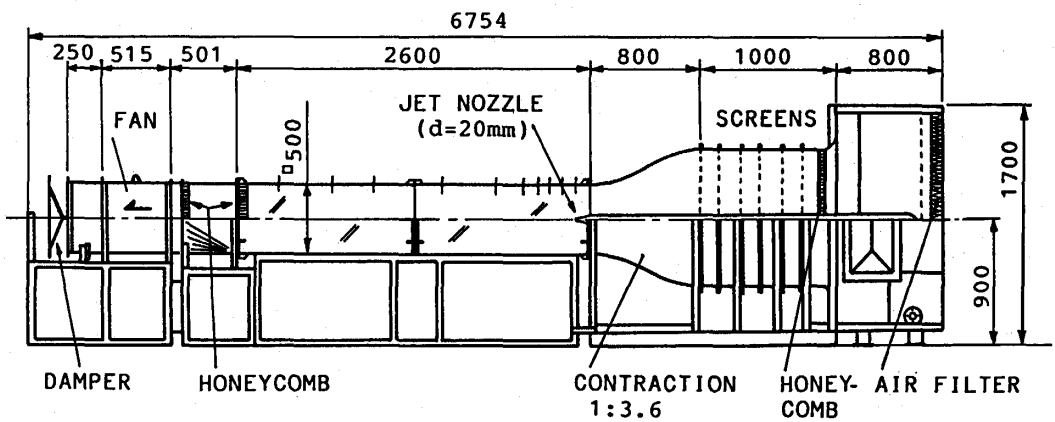


Fig. 1 Low turbulence wind tunnel with a jet nozzle

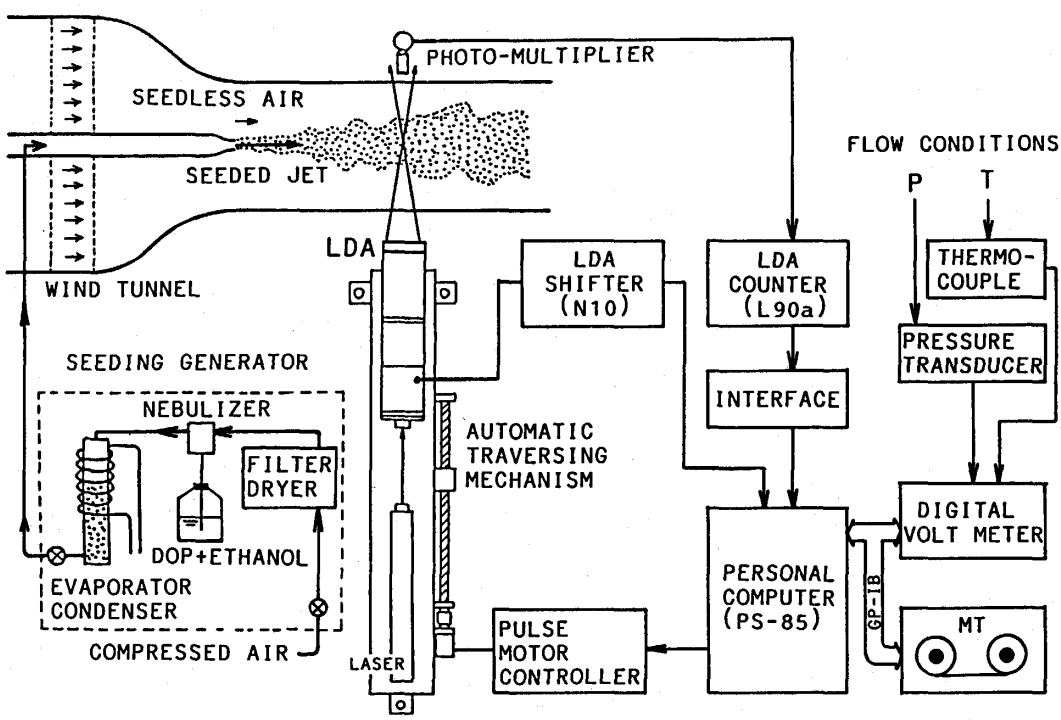


Fig. 2 Experimental apparatus and instruments

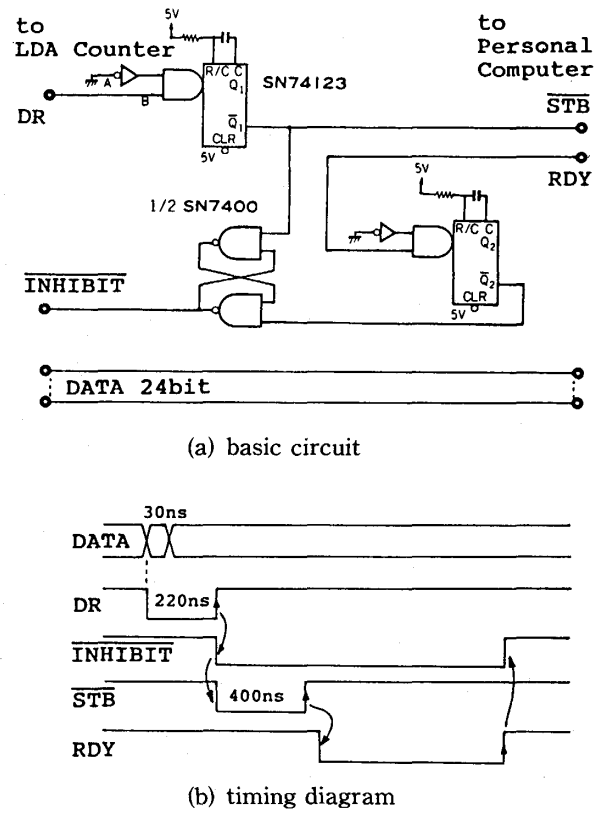
えノズルから噴出した流体・微粒子は，ほぼ全量が乱流域に留まる。一様平行流から微粒子を除去し，噴出流のみにシーディングすれば，LDA ではこの微粒子の速度が測定されるので乱流域平均が直接測定される。

2．2　実験装置・実験方法

2．2．1　実験装置　図1に実験装置の概略を示す。吸込式低乱風洞の試験部は断面 500×500mm，長さ 2.6m の透明アクリル板製のダクトで，その中に一様流を流し，断面中央の円形ノズル（直径 d=20mm）から噴流を平行に噴出させた。一様平行流の乱れ度は 0.22%（0.15Hz～2.5kHz 範囲）で十分小さい。また，噴出流のみにシーディングして，周囲の一様平行流にはシーディング粒子・塵が入らないよう風洞吸込口にエアフィルタ（日本バイリーン VW−90A−18）を付けた。

図2に計測システムの概略を示す。レーザドップラ流速計（LDA）は DANTEC 55X の前方散乱で，光源として 15mW の He-Ne レーザ（λ=633nm）を用い，送光系は，ブラッグセル，ビームエキスパンダ（拡大比1.9375），焦点距離 310mm の送光レンズよりなり，交差角 12.82° である。この場合，焦点の計測域の径は 0.12mm，長さは 0.99mm である。また受光系は焦点距離 600mm の受光レンズとフォトマルよりなる。測定トラバースにはこの光学系全体を自動トラバース装置で移動させた。ドップラ信号処理器としては周波数カウンタ（DANTEC L 90a）を用いた。ドップラ周波数 f および測定時間間隔 Δt のディジタル出力を CPU に Z80A を用いたパーソナルコンピュータ（TEAC PS−85）で収得した。

図3はディジタル出力の収得システムを示す。データ転送に際しては転送制御信号の方式がカウンタとパソコンの DI/DO では異なるためインターフェース回路を製作した。図4にインターフェースの基本回路を示す。ワンショットマルチバイブレータと RS フリップフロップを使用している。粒子が焦点を通過し速度が計測されると，f, Δt のデータは DR 信号を伴って



(a) basic circuit

(b) timing diagram

Fig. 4　Interface for digital signal acquisition

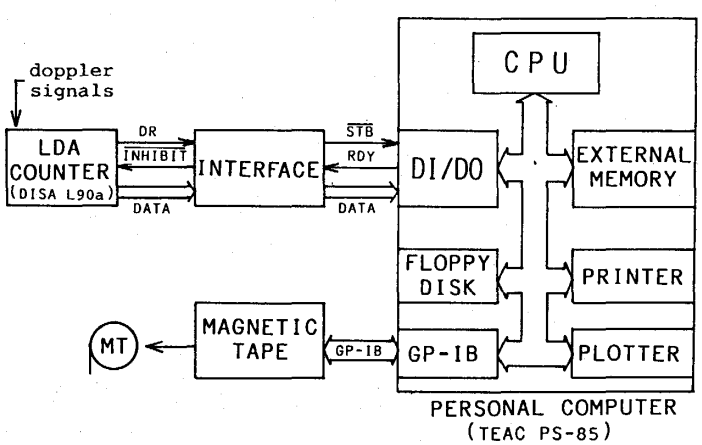


Fig. 3　Acquisition of LDA digital signals

```
C
      DO 30 J=1,NK
      I=I+1
      II=I-I0+1                                          (2 : printer)
      IF(I.EQ.I0) WRITE(2,300) ND,A(1),A(3),UB,IC
      IF(I.GT.IN) GO TO 50
      CALL FNA4(LI,I,LA)
C                                        TRAVERSE & UJ UC TC
   35 CALL TRAV(Y(II),0)                  ←— automatic traversing
      CALL INPUT(' ND=',4,XX)
      IF (XX.LT.0.5) GOTO 36
      ND=XX+0.1
      A(14)=ND
      NDA=NDA0
      IF (NDA.GT.ND) NDA=ND
      A(18)=NDA
      WRITE(2,350) ND,IC
   36 CALL MES1(A(5),A(4),A(7))    ←— monitor of flow conditions
      WRITE(4,130) II,LA,Y(II),A(4),A(5),A(7),IT,IC      (4 : CRT)
      WRITE(2,310) II,LA,Y(II),A(4),A(5),A(7),A(6),
     &             A(9),A(10),IT,IC
C                                              LDA
      CALL LSET(FS)                  ←— reset I/O interface
      CALL LINPX(ND)                 ←— acquisition of LDA data
      CALL LLOC                      ←— localize I/O interface
C                                              AVERAGE (NDA)
      CALL EXOVCK(ND,IOV)                ←— examine acquired time data
      IF (IOV.NE.0) GOTO 80
      CALL EXREAD(1,NDA,B1,B2,IB3,0,IE)          ←— read out sample data
      FFS=FS
      CALL TRAN1(NDA,B1,B2,IB3,FFS,UB*1.E6,TB,FF,A(15),A(17))
C                                              L processing of sample data
      A(16)=FF*1.E6
C     FFS=FS*1.E-6
      IF(TA*ND.LT.600.) GO TO 40
      CALL MES1(HC,HJ,TC)
      WRITE(2,320) A(15),A(17),HJ,HC,TC,FF,FFS,IC
      A(7)=(A(7)+TC)/2.
      A(4)=(A(4)+HJ)/2.
      A(5)=(A(5)+HC)/2.
      GO TO 45
   40 WRITE(2,330) A(15),A(17),FF,FFS,IC
   45 A(2)=Y(II)
      A(11)=UB
      A(12)=TB
      A(13)=FS
C                                              EX MEM TO MT
      CALL EXMT (ND,LA,A,IE)             ←— write acquired data on MT
      IF(IE.NE.0) GO TO 99
   30 CONTINUE
```

(a) central part of main program

Fig. 5 Program LS1 for acquisition and processing (FORTRAN-80)

```
                                                Processing of LDA data
C       DATA TRANSFORM                           (without 3σ rejection)
C            FA:MHZ , FS:HZ-----> FS:MHZ
C            UB:(M/S)/MHZ , UA:M/S , A1-----> A1:M/S
C            TB,TA:SEC , A2-----> A2:SEC
        SUBROUTINE TRAN1(ND,A1,A2,IA3,FS,UB,TB,FA,UA,TA)
C
      DIMENSION A1(ND),A2(ND),IA3(ND)
      DATA FB/14.9596/
C
      FA=0.
      U0=0.
      U1=0.
      DO 10 I=1,ND
      KT=IA3(I)/16
      KD=IA3(I)-KT*16
      A1(I)=A1(I)*(2.**KD)*FB
      A2(I)=A2(I)*(2.**KT)*TB+.2E-6
      FA=FA+A1(I)
      A1(I)=(A1(I)+FS)*UB*1.E-6
      IF(ABS(A1(I)).LT.1.E-2) GOTO 10
      U0=U0+SIGN(1.,A1(I))  } biasing correction with 1-d weighting
      U1=U1+1./ABS(A1(I))
   10 CONTINUE
      TA=0.
      DO 20 I=2,ND
      TA=TA+A2(I)
   20 CONTINUE
      FA=FA/FLOAT(ND)*1.E-6
      FS=FS*1.E-6
      UA=U0/U1
      TA=TA/FLOAT(ND-1)
      RETURN
      END
C
C                                        Acquisition of LDA data
      SUBROUTINE LINPX (ND)              (write on external memories)
C         LDA I/O   TO   EX MEMORY      ND:EVEN .LE.21844
      COMMON /EX0/ L0,M0,M1
      L0=Z'3678'
      M0=L0+4
      M1=L0+5
      CALL POKE (L0+3,Z'82')
C                                        EX WRITE ADDRESS-CLEAR
      DO 10 I=1,ND,2
   20 IF(INP(Z'C6').AND.7) GO TO 20
      CALL POKE (M0,INP(Z'C0'))
      CALL POKE (M1,INP(Z'C2'))
      CALL POKE (M0,INP(Z'C4'))
   30 IF(INP(Z'C6').AND.7) GO TO 30
      CALL POKE (M1,INP(Z'C0'))
      CALL POKE (M0,INP(Z'C2'))
      CALL POKE (M1,INP(Z'C4'))
   10 CONTINUE
      RETURN
      END
```

(b) subroutine TRAN1 and LINPX

TRAN1, Processing of LDA data (without 3σ rejection)

LINPX, Acquisition of LDA data (Transfer digital data from frequency counter to external memories via I/O interface)

Fig. 5 Program LS1 for acquisition and processing (FORTRAN−80)

出力される。インターフェースはDR信号が出力されるとパソコン側に$\overline{\mathrm{STB}}$信号でデータの出力を知らせ，LDAカウンタへは$\overline{\mathrm{INHIBIT}}$信号を出して次の測定を禁止する。パソコンはデータ読取りが完了するとRDY信号を出す。インターフェースはRDY信号を見てLDAカウンタへの$\overline{\mathrm{INHIBIT}}$信号を解除して，次の測定を可能にする。

データ信号はドップラ周波数12bit（仮数部8bit，指数部4bit）と測定時間間隔12bit（仮数部8bit，指数部4bit）の計24bitでパソコンに直結した。インターフェースにはこのほか，転送データ数の計数，タイムベースの設定，リモート／ローカルの切替，ウィンドウの機能も持たせた。パソコンに収得したデータは一旦，外部メモリ（64KByte）に書き込み，一回の測定終了後，ディジタル磁気テープ（MT）（1200ft，約20 Mbyte）に記録した。

図5に本実験に用いた計測プログラム（LS1）の主要部を示す。図5(a)にメインプログラムの主要部分，(b)にサブルーチンTRAN1，LINPXを示す。プログラムは全てFORTRAN-80で書かれている。サブルーチンLINPXではカウンタからのディジタルデータをパソコンの外部メモリに書込んでいる。

以上のデータ収得システムで最高データレイト4kHz（＝データ/s），最大連続サンプル数N_{max}=21844のLDA計測ができる。収得したデータの計算処理は，実験後，大型計算機で行った。

2．2．2 シーディング粒子 シーディング粒子として平均粒径d_p=0.8μmのDOP（フタル酸ジオクチル）のミストを用いた。図2に示すシーディング発生装置[5)6)]は噴霧分散型粒子発生装置（KANOMAX 3076）と蒸発凝縮器（KANOMAX 3072）より成り，単分散粒径分布の微粒子を発生させる。粒子発生量は10^8個/s程度である。本研究の場合，フリンジ間隔が2.83μmであるから十分なビジビリティが得られる。また，0.8μmのDOPは，11.3kHzまでの速度変動に追随[7)~9)]（99%振幅追随性）するので，十分な追随性を有している。さらに粒径の分布を考慮に入れても，本実験の場合d_p=0.8μmで，分布の幾何標準偏差σ_g=1.3であるから累積確率95%の粒径は1.23μmである。この粒径は4.77kHzまで追随するので，ほとんどの粒子が本研究の乱流に十分追随する。また，0.8μmの粒子はエアフィルタで95%除去可能なので，選択的シーディングするのに適している。

2．2．3 計測条件・計算処理方法 収得データ数は測定点毎にN=10000とした。ただし，噴流周縁部で間欠度のきわめて低いところでは，シーディング粒子の濃度が低いためデータレイトが低下するので，データ数はN=200～5000個と少なくした。速度変換係数は2.83(m/s)/MHzである。またLDAカウンタはコンバインドモード（5/8フリンジ比較，1データ／バースト）で用いた。なおシフト周波数は−1MHzで，この場合焦点のフリンジは流れと対向する向きへ2.83m/sで走行する。

平均速度，乱れなどの平均計算には，速度バイアス誤差を補正した。速度バイアス誤差とは，LDA測定での測定確率が流速に比例することによる誤差で，本研究では，式(1)，(2)の一次元重みバイアス補正[10)]して平均した。

$$\bar{u}=\sum_{i=1}^{N}\frac{u_i}{|u_i|}\Big/\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{|u_i|} \qquad (1)$$

$$\sqrt{\overline{u'^2}}=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{|u_i|}(u_i-\bar{u})^2\Big/\sum_{i=1}^{N}\frac{1}{|u_i|}} \qquad (2)$$

ここでu_iは瞬間速度の測定値である。

本実験のように一様流がある流れでは，瞬間流向偏角が小さく一次元重みで十分正しい補正ができる。図5(b)のサブルーチンTRAN1にバイアス補正平均プログラムを示す。

なお，平均を行う際には「3σ棄却」を適用した。つまり，速度変動の標準偏差σ（$=\sqrt{\overline{u'^2}}$）の3倍を超える測定値（$u_i>\bar{u}+3\sigma$あるいは$u_i<\bar{u}-3\sigma$）については計側上の雑音によるものと考えて除外した[11)]。その場合，あらかじめσの真値を知ることができないので，3σ棄却しながら式(1)(2)の計算を繰り返した。繰返し回数は3回で十分であった。以上のほか，測定のデータレイトR(Hz)を，

$$R=\left(\frac{1}{N-1}\sum_{i=2}^{N}\Delta t_i\right)^{-1} \qquad (3)$$

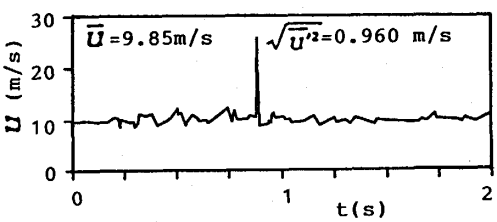
で求めた。ここでΔt_i(s)は測定時間間隔で，u_iとu_{i-1}が計測された時刻の差である。

2．2．4 実験条件 実験は噴出速度$\bar{u}_j$=37.5m/s，一様平行流速$\bar{u}_e$=7.5m/sで行った。速度比は$\bar{u}_e/\bar{u}_j$=0.2であり，速度差についての噴出レイノルズ数は$Re_j=(\bar{u}_j-\bar{u}_e)d/\nu=4.1\times10^4$である。噴出流のみにシーディングした。以後，このシーディング方法を噴流シーディングと呼ぶ。なお，噴流中のDOP粒子濃度は十分小さく，流れに対する影響は無視できる[4)]。測定は噴流の十分発達した領域のx/d=50,100の2断

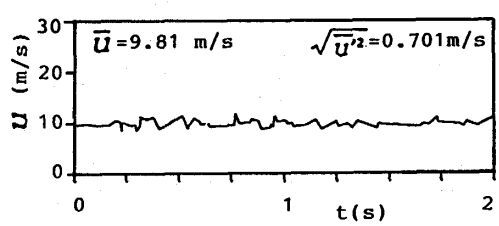
面で行い，平均速度，乱れ強さの半径方向分布を得た。なお，xは噴流口を原点とする下流方向座標である。

2．3　実験結果および考察

2．3．1　測定方法・測定精度に関する検討　測定データの平均計算に際して適用した3σ棄却の効果を検討するため，図6に噴流の十分発達した領域のx/d=100における速度の時刻歴を示す。元のデータ（図6a）には雑音と考えられる鋭い高速のスパイクが見られるが，3σ棄却の適用によって不良データがよく除去できているのがわかる。また図7に，同じ測定点での速度確率密度を示す。全体的には正規分布になっている。この図に3σ棄却の上限・下限値を示しているが，有効なデータをほとんど除外することなく雑音がよく除去されていることがわかる。平均値に及ぼす3σ棄却の効果は，測定データによって異なるが，乱れ強さで特に顕著で，1～30%減少した。しかし平均速度への影響は小さく1%未満の減少しか生じなかった。



(a)　without 3σ rejection



(b)　with 3σ rejection

Fig. 6　Effect of 3σ rejection
(x/d=100, y/d=1.1　jet seeding)

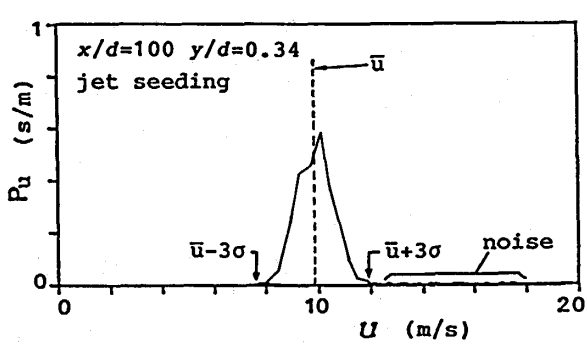
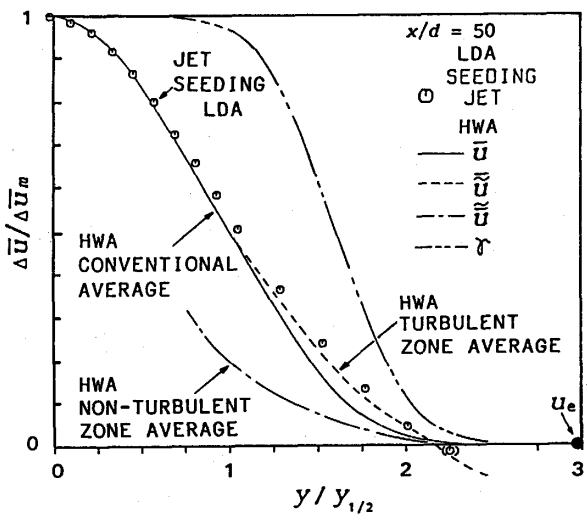
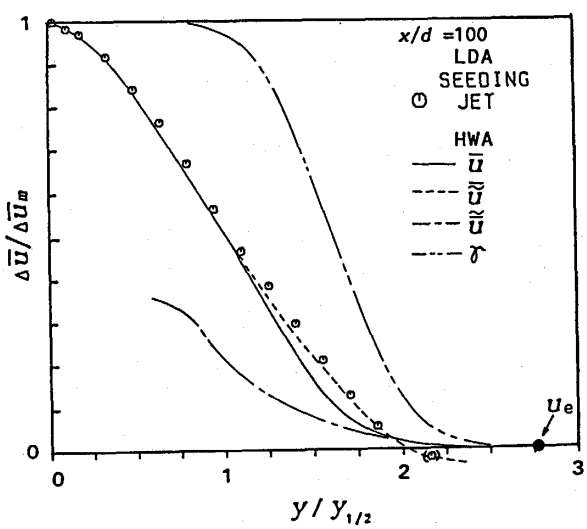


Fig. 7　Probability density of velocity

次に噴流シーディングして得られた乱流域平均の測定精度について検討する。実験では，一様平行流からはエアフィルタで微粒子を除去しているが，完全に零にはできず，エアフィルタを貫通してきた微粒子がわずかながら一様流中を流れている。その測定データレイトは0.15Hz程度であった。この非乱流域での微粒子の存在は測定された速度が全て乱流域から得られると考える本方法にとって誤差要因となり得るが，噴流中心部のデータレイトは50Hz程度で，データレイトの比は3/1000であるから，ほとんどの場合誤差は無



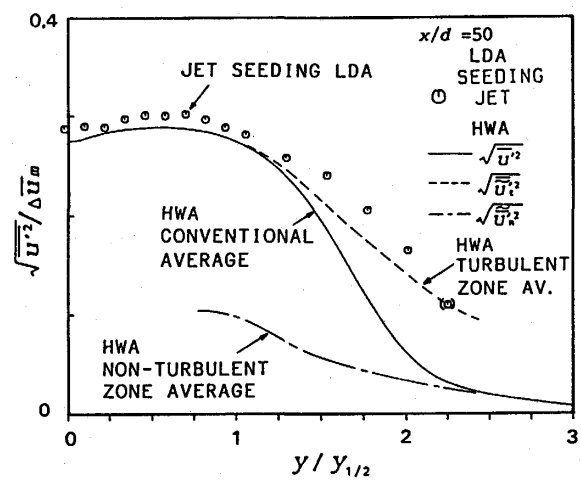
(a)　mean velocity (x/d=50)



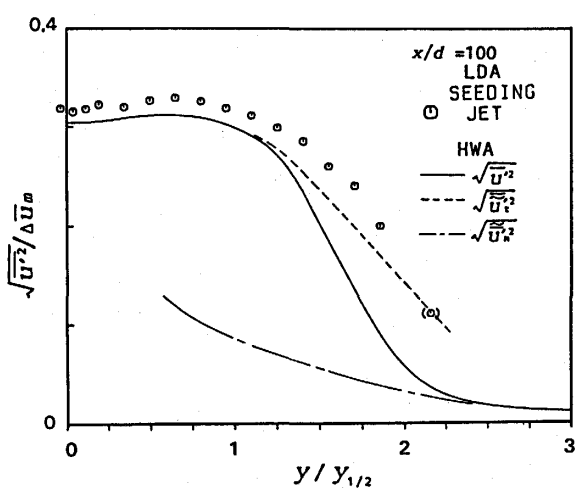
(b)　mean velocity (x/d=100)

Fig. 8　Jet seeding LDA and HWA conditional zone average (mean velocity)

視できる。しかし噴流周縁部特に間欠度γ<0.05のところではデータレイトが極めて低くなって0.15Hzに近づき，測定平均値に対する非乱流域からの寄与が無視できなくなる。そこで非乱流域データレイトを0.15Hzとして，測定データレイトをもとに非乱流域からの寄与割合を評価した。その場合には，データレイト0.6Hzでは非乱流域25%（乱流域75%），データレイト2.7Hzでは非乱流域6%(乱流域94%)のような割合でデータが混ざって測定されていることになる。そこで，非乱流寄与割合が25%以上の測定値はグラフから削除し，非乱流寄与割合が6%以上25%未満のLDA測定値には（ ）をつけて少し誤差を含むことを表示した。なお付表5，6に測定値とそのデータレイトを示す。



(a) turbulent fluctuation (x/d=50)



(b) turbulent fluctuation (x/d=100)

Fig. 9 Jet seeding LDA and HWA conditional zone average (turbulent fluctuation)

2. 3. 2 HWA乱流域平均との比較 図8にx/d=50, 100において噴流シーディングしてLDA測定した平均速度を示す。縦軸は一様平行流よりの超過速度$\Delta\bar{u}$を噴流中心での値$\Delta\bar{u}_m$（噴流シーディング測定値）で無次元化し，横軸は半径方向座標yを速度半値幅$y_{1/2}$（HWAによる測定値）で無次元化している。図には，HWA測定より求めた領域平均速度[3]も示すが，LDA噴流シーディングとHWA乱流域平均との一致は極めて良い。特に噴流の大規模渦運動による外縁部の逆流の存在[3]がLDAでも良くとらえられている。次に図9に乱れ強さの分布を示す。LDA噴流シーディングはHWA乱流域平均よりやや高い値を示しているが，それでも傾向は良く合っている。異なる計測システムで得られたことを考えると両者の一致は極めて良いと言える。

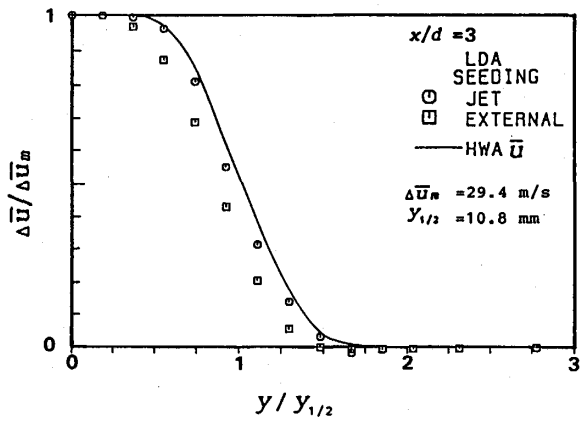
3. 選択的シーディングの効果

前章では噴流のみにシーディングして十分発達した領域でLDA測定すれば，全平均速度ではなく，乱流域平均が測定されることを明らかにした。ここでは逆に一様平行流だけにシーディングしてLDA測定して噴流シーディングと比較し，シーディングの方法の違いによる測定値の差異を調べ，その物理的意味について検討する。この一様平行流だけにシーディングすることを外部シーディングと呼ぶ。なお実験は噴流初期領域（x/d=3, 5）から十分発達した領域（x/d=10, 20, 50, 100）まで6断面について行い，それぞれの断面について選択的シーディングの効果を調べた。

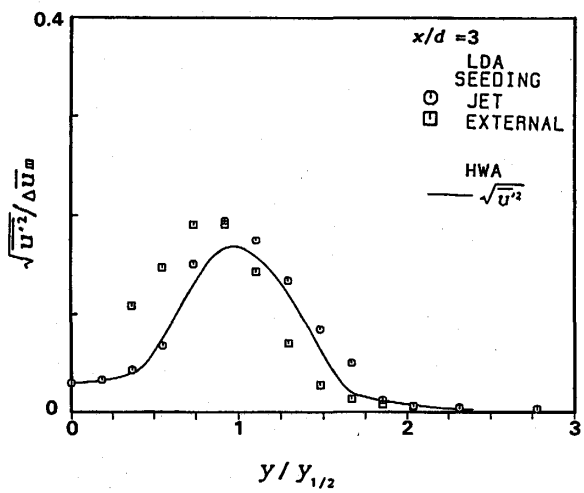
3. 1 実験方法 実験装置，計測システム，実験条件等は前章と同じである。ここでは噴流シーディングに加え，外部シーディングのLDA測定をした。外部シーディングの場合，噴流からはエアフィルタで微粒子を除去し一様流には風洞吸込口のエアフィルタの下流直後でシーディング供給管（内径 約ϕ6mm）を挿入してシーディング粒子を混入した。そのため一様平行流中のシーディング粒子の濃度分布は一様ではなく一部に集中している。なお，供給管を入れた場所は風洞整流部の上流であるから一様平行流が乱されることはない。

3. 2 実験結果および考察 図10～15に噴流シーディングと外部シーディングの比較を示す。また付表に測定値とデータレイトを示す。

3. 2. 1 噴流が十分発達した領域（x/d=10～100） まずはじめに，噴流が十分発達して平均速度分布の

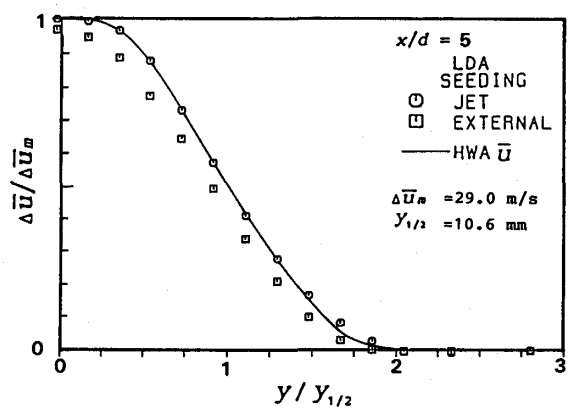


(a) mean velocity

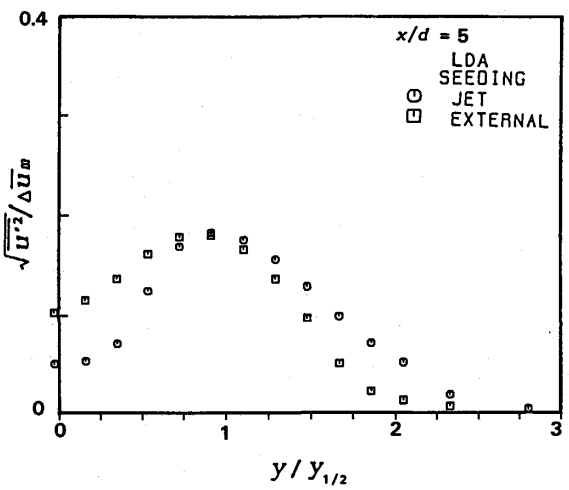


(b) turbulent fluctuation

Fig. 10 Effect of selective seeding in initial region of jet (x/d=3)



(a) mean velocity

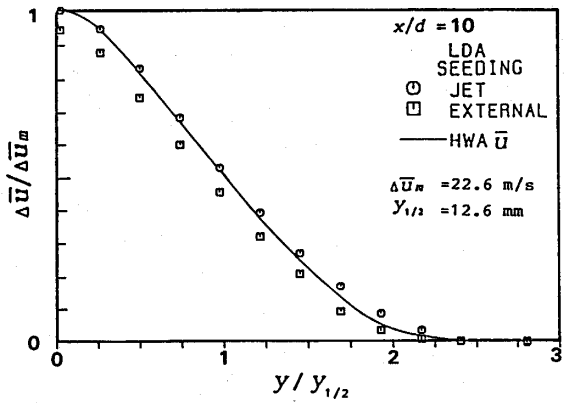


(b) turbulent fluctuation

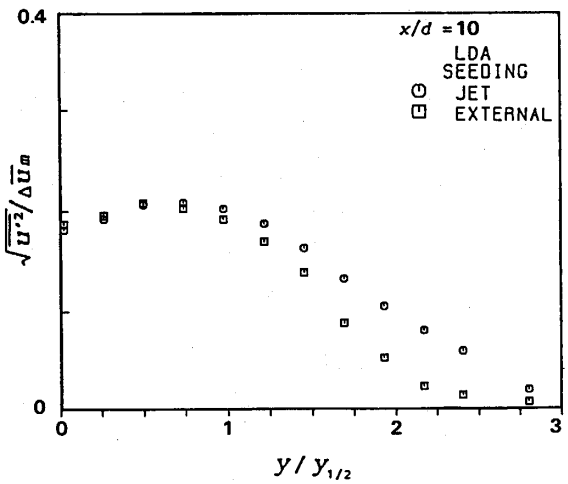
Fig. 11 Effect of selective seeding in initial region of jet (x/d=5)

相似性が成立っている領域における選択的シーディングの効果（図12～15）を検討する。平均速度の分布全体に噴流シーディングのほうがやや速く，選択的シーディングの効果が現れている。HWAによる平均速度はほぼ両シーディングの間に位置している。また乱れ強さは噴流中心ではシーディング方法によらず同じであるが，外縁部では選択的シーディングの効果が顕著である。このような傾向は十分発達した領域での測定の全て（x/d=10～100）に共通して見られる。また x/d=50, 100 において HWA による条件付領域平均と比較（図14, 15と図8，9の比較）すると，噴流シーディングが乱流域平均を表すことは既に述べたが，外部シーディングは非乱流域平均とは合わないことがわかる。これは外部シーディングによって一様流に供給されたシーディング粒子は噴流のエントレインメント運動によって乱流域に取込まれ，乱流域と非乱流域の両方に微粒子が存在するためと考えられる。この場合，粒子濃度は必ずしも均一ではないから全平均が測定されるのではなく粒子濃度の比に対応した値が得られる。外部シーディング測定値が噴流中心部において乱流域平均に近い値を示すことは，一様平行流に供給された微粒子が測定断面の上流で乱流域に取込まれ乱流域の特性を表すようになったためと考えられる。

3. 2. 2　噴流初期領域（x/d=3, 5）　図10, 11の平均速度では，噴流シーディングの方がやや速く，選択的シーディングの効果が現れている。この場合，HWAによる全平均と噴流シーディングとの差は小さい。また図10, 11の乱れ強さは噴流剪断層の内側と外側では大小関係が逆で，内側では外部シーディングの方が大きく，外側では噴流シーディングの方が大きくなって

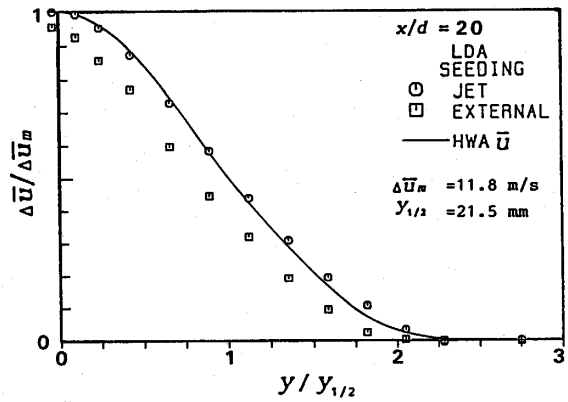


(a) mean velocity

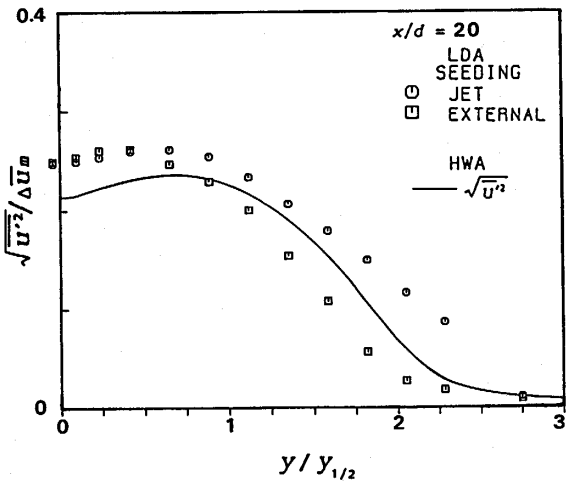


(b) turbulent fluctuation

Fig. 12 Effect of selective seeding in fully developed region of jet (x/d=10)



(a) mean velocity



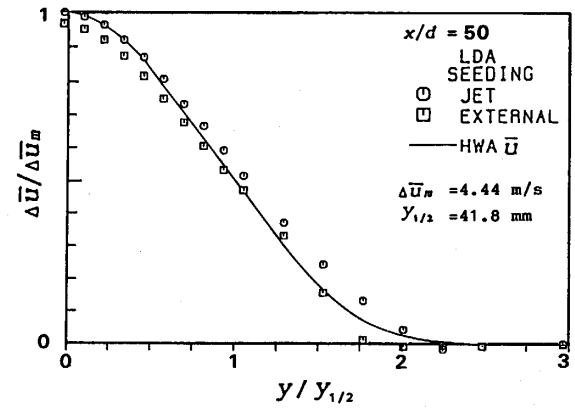
(b) turbulent fluctuation

Fig. 13 Effect of selective seeding in fully developed region of jet (x/d=20)

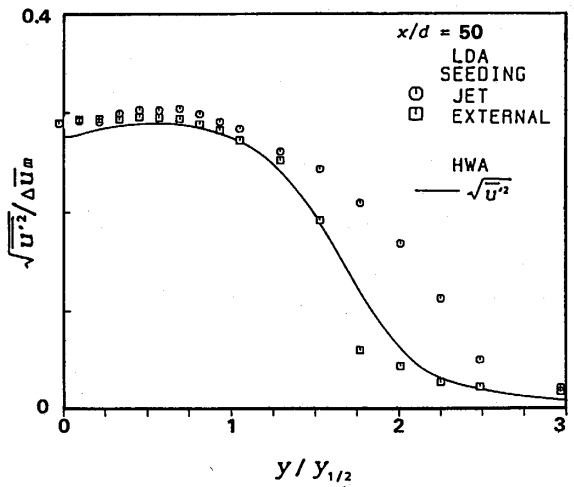
選択的シーディングの効果が顕著に現れている。噴流初期領域では中心部にポテンシャルコアがあり剪断層の中央部（$y/y_{1/2}\simeq1$）が乱流で，噴流中心部や周縁部は非乱流という流れ場になっている。それゆえ，この場合は噴流シーディング測定値は乱流域平均とは対応しない。しかし噴流中心部の外部シーディング測定値や，噴流周縁部の噴流シーディング測定値は乱流剪断層を横切って到達したシーディング粒子の速度であり，それゆえ乱流域平均に近い測定値を与えるものと考えられる。実際，これらの値は，図10bによれば，HWAによる全平均乱れ強さよりも大きな値になっている。つまり噴流中心部での外部シーディング測定は乱流域を測定していることが多く，噴流シーディング測定は非乱流域を測定していることが多くなっており，また噴流周縁部では逆の関係になっているので，噴流シーディングと外部シーディングの乱れの測定値の大小関係が剪断層中央で逆転すると説明することができる。

また，この実験結果は，噴出した流体と周囲の流体が乱流混合する過程において，それぞれの流体の速度・乱れがどの様に変化し分布するかを示すものであり，燃焼や化学反応の過程を考える上で極めて重要な情報である。

3. 2. 3　3σ棄却の問題点　本実験ではデータの計算処理に際しては全ての測定について3σ棄却を適用している。3σ棄却は速度変動の標準偏差σの3倍を越える測定値を計測上の誤差と考えて除去するもので，その有効性については図6に示した。しかし，この方法を特異な速度ピークを持つ噴流初期領域に適用したところ問題が生じた。例として，図16に x/d=3,

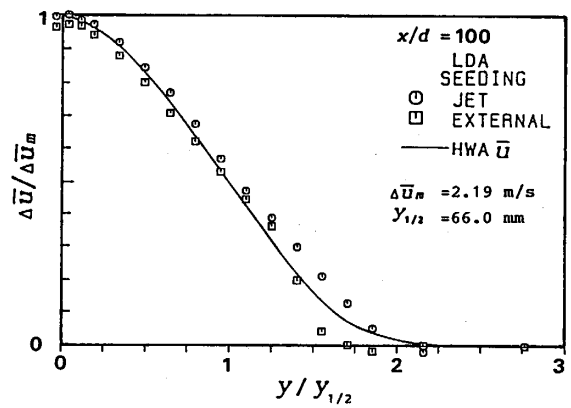


(a) mean velocity

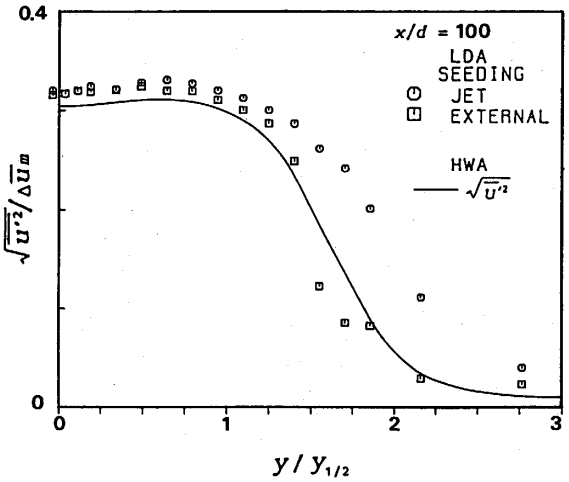


(b) turbulent fluctuation

Fig. 14 Effect of selective seeding in fully developed region of jet (x/d=50)



(a) mean velocity



(b) turbulent fluctuation

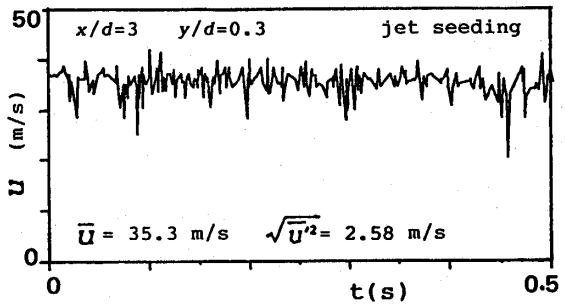
Fig. 15 Effect of selective seeding in fully developed region of jet (x/d=100)

y/d=0.3 での3 σ 棄却の効果を示す。この測定位置はポテンシャルコアと乱流剪断層の境界付近である。図16aの元データに見られる負のスパイクは熱線流速計でも観察される速度負ピーク（negative u peak）と考えられる[12]。このピークは剪断層の大規模渦運動によって生じるものであり計測上の雑音ではない。ところが3 σ 棄却（図16b）によってこのスパイクはほぼ完全に除去されてしまっている。噴流初期領域では速度負ピークのほか，剪断層外縁では速度正ピーク，剪断層中央では両方のピークが現れるので，全般に速度確率密度は歪んだ分布形をしており正規分布とはかなり異なる。

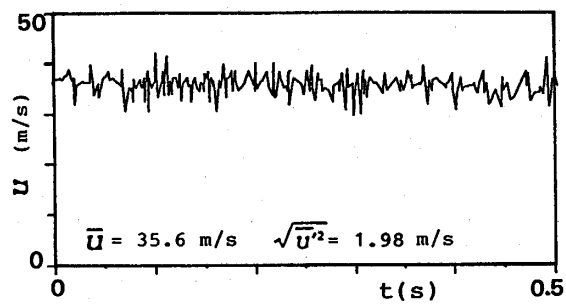
3 σ 棄却は速度確率密度が正規分布であることを前提に，雑音を除去して統計的平均量を精度良く求めるために考案されたものであるから，このようなスパイク波形に対応することができない。噴流初期領域での雑音除去には，3 σ 棄却の修正などの工夫が必要になると考えられる。なお，図10，11の計測では，3 σ 棄却をそのまま使っているので，x/d=3, 5 では乱れ強さはいくぶん小さく測定されていることになる。

4. あとがき

噴流シーディングしてLDAで測定した乱流域平均と従来のHWAによる測定はよく一致した。全く原理の異なる方法で得た結果がよく一致したことから，この2つの乱流域平均測定方法の妥当性が確認されたと言える。LDAを用いた本方法は従来のような複雑な信号処理や乱流・非乱流判別を必要としないので乱流域平均を比較的簡単に得ることができ，今後，乱流



(a) without 3σ rejection ction



(b) with 3σ rejection

Fig. 16 3σ rejection in initial region of jet

間欠性研究に役立つものと思われる。

また，噴流のみあるいは非乱流のみにシーディングして比較したところ，選択的シーディングの効果が顕著に現れ，特に乱れ強さには大きな違いが生じた。十分発達した領域では噴流シーディングは乱流域に対応するが，外部シーディングでは微粒子は乱流域と非乱流域の両方に存在するので非乱流域とは対応しないことが明らかになった。また初期領域では噴流シーディングと外部シーディングの結果から乱流剪断層の混合過程における流体粒子の速度・乱れの変化・分布を知ることができた。

また，本研究結果からシーディングの違いによってLDA 測定値，特に乱れ強さの値が大きく異なることが明らかになった。このことから，LDA によって全平均を正しく測定するには，測定場におけるシーディング粒子濃度の一様性が重要であることがわかる。

なお，本論文は流れの計測と可視化大阪ジョイント講演会（1985−10）での講演を基に加筆したものである。

実験遂行にあたり特に LDA 計測について速水　洋教授の教示を得ました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

1) 妹尾，九大生産研所報，**80** (1986), 123.
2) 例えば，Jimenez, J., *The Role of Coherent Structure in Modelling Turbulence and Mixing* (Springer-Verlag, 1981)
3) 高曽，西野，栗山，妹尾，機論，**54**−504, B(1988), 1929.
4) 高曽，西野，妹尾，機論B　投稿中 No.88−550A. 高曽，西野，妹尾，流体力学会　第17回乱流シンポジウム (1985), 49.
5) 高橋幹二，基礎エアロゾル工学，(養賢堂，1982), P.183.
6) Liu, B. Y. H., Lee, K. W., *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* **36** (1975), 861.
7) 速水，植木，妹尾，九大生産研報告，**74** (1983), 167.
8) Melling, A., Whitelaw, J. H., *DISA Inf.* No. 15 (1973), 5.
9) Hjelmfelt, A. T. Jr, Mockros, L. F., *Appl. Sci. Res.* **16** (1966), 149.
10) McLaughlin, D.K., Tiederman, W.G., *Phys. Fluids.* **16**−2 (1973), 2083.
11) 前田，計装　**26**−4 (1983), 32.
12) Yule, A. J., *J. Fluid Mech.*, **89**−3 (1978), 413.

付　表

Table 1(a) Jet seeding ($x/d=3$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L405	−0.2778	0.9979	0.0375	733.4
2	L406	0.0	1.0000	0.0296	477.4
3	L407	0.1852	0.9987	0.0328	492.1
4	L408	0.3704	0.9933	0.0428	604.4
5	L409	0.5556	0.9593	0.0674	548.5
6	L410	0.7407	0.7997	0.1486	403.4
7	L411	0.9259	0.5425	0.1926	236.9
8	L412	1.1111	0.3085	0.1728	165.5
9	L413	1.2963	0.1356	0.1319	54.6
10	L414	1.4815	0.0308	0.0841	28.1
11	L415	1.6667	−0.0192	0.0499	5.0
12	L416	1.8519	−0.0073	0.0127	4.3
13	L417	2.0370	−0.0056	0.0071	2.6
14	L418	2.3148	−0.0032	0.0052	1.9
15	L419	2.7778	−0.0022	0.0038	1.7

Table 1(b) External seeding ($x/d=3$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L458	0.3704	0.9654	0.1073	1.3
2	L450	0.5556	0.8646	0.1455	6.8
3	L460	0.7407	0.6781	0.1889	68.7
4	L461	0.9259	0.4239	0.1890	36.5
5	L462	1.1111	0.2006	0.1407	76.5
6	L463	1.2963	0.0548	0.0701	62.8
7	L464	1.4815	−0.0001	0.0281	43.7
8	L465	1.6667	−0.0058	0.0137	113.9
9	L466	1.8519	−0.0051	0.0085	67.6
10	L467	2.0370	−0.0048	0.0062	77.1
11	L468	2.3148	−0.0032	0.0040	89.4

Table 2(a) Jet seeding ($x/d=5$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L506	−0.0283	0.9997	0.0493	364.2
2	L507	0.1604	0.9934	0.0521	376.6
3	L508	0.3491	0.9647	0.0691	359.7
4	L509	0.5377	0.8732	0.1219	321.1
5	L510	0.7264	0.7238	0.1671	282.3
6	L511	0.9151	0.5647	0.1814	204.9
7	L512	1.1038	0.4063	0.1738	206.7
8	L513	1.2925	0.2767	0.1536	147.1
9	L514	1.4811	0.1666	0.1261	83.8
10	L515	1.6698	0.0829	0.0965	62.4
11	L516	1.8585	0.0274	0.0697	28.7
12	L517	2.0472	−0.0033	0.0504	5.2
13	L518	2.3302	−0.0079	0.0184	0.5
14	L519	2.8019	−0.0006	0.0046	0.3

Table 2(b) External seeding ($x/d=5$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L556	−0.0283	0.9676	0.1002	28.8
2	L557	0.1604	0.9448	0.1129	28.0
3	L558	0.3491	0.8836	0.1346	69.7
4	L559	0.5377	0.7678	0.1594	71.7
5	L560	0.7264	0.6373	0.1768	111.4
6	L561	0.9151	0.4865	0.1780	134.8
7	L562	1.1038	0.3360	0.1643	148.5
8	L563	1.2925	0.2082	0.1344	150.0
9	L564	1.4811	0.1000	0.0947	161.5
10	L565	1.6698	0.0306	0.0493	139.6
11	L566	1.8585	0.0014	0.0220	124.5
12	L567	2.0472	−0.0024	0.0129	123.5
13	L568	2.3302	−0.0026	0.0072	158.2
14	L569	2.8019	−0.0009	0.0039	120.2

Table 3(a) Jet seeding ($x/d=10$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L607	0.0238	0.9999	0.1799	180.0
2	L608	0.2619	0.9424	0.1907	189.5
3	L609	0.5000	0.8241	0.2056	141.8
4	L610	0.7381	0.6743	0.2077	119.2
5	L611	0.9762	0.5229	0.2007	91.5
6	L612	1.2143	0.3875	0.1860	107.6
7	L613	1.4524	0.2671	0.1612	108.6
8	L614	1.6905	0.1660	0.1309	117.1
9	L615	1.9286	0.0837	0.1032	76.2
10	L616	2.1667	0.0327	0.0794	28.2
11	L617	2.4048	−0.0017	0.0582	6.2
12	L618	2.8016	−0.0046	0.0197	0.6

Table 3(b) External seeding ($x/d=10$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L657	0.0238	0.9396	0.1855	59.8
2	L658	0.2619	0.8712	0.1944	81.3
3	L659	0.5000	0.7351	0.2070	121.5
4	L660	0.7381	0.5923	0.2016	146.5
5	L661	0.9762	0.4496	0.1905	158.5
6	L662	1.2143	0.3169	0.1677	160.8
7	L663	1.4524	0.2053	0.1370	162.7
8	L664	1.6905	0.0895	0.0869	91.1
9	L665	1.9286	0.0327	0.0516	50.6
10	L666	2.1667	0.0060	0.0231	123.8
11	L667	2.4048	0.0005	0.0143	84.9
12	L668	2.8016	0.0000	0.0074	148.8

Table 4(a) Jet seeding ($x/d=20$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L007	−0.0419	0.9983	0.2453	201.0
2	L008	0.0977	0.9917	0.2479	213.0
3	L009	0.2372	0.9504	0.2517	211.6
4	L010	0.4233	0.8673	0.2580	196.9
5	L011	0.6558	0.7225	0.2596	136.7
6	L012	0.8884	0.5778	0.2527	112.2
7	L013	1.1209	0.4335	0.2315	83.0
8	L014	1.3535	0.3045	0.2050	73.0
9	L015	1.5860	0.1940	0.1774	51.9
10	L016	1.8186	0.1075	0.1481	23.3
11	L017	2.0512	0.0344	0.1154	7.4
12	L018	2.2837	−0.0040	0.0864	1.9
13	L019	2.7488	0.0021	0.0113	0.3

Table 4(b) External seeding ($x/d=20$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L057	−0.0419	0.9537	0.2479	33.4
2	L058	0.0977	0.9223	0.2521	44.6
3	L059	0.2372	0.8510	0.2586	44.5
4	L060	0.4233	0.7634	0.2599	75.2
5	L061	0.6558	0.5910	0.2449	92.6
6	L062	0.8884	0.4395	0.2275	131.5
7	L063	1.1209	0.3166	0.1986	161.5
8	L064	1.3535	0.1907	0.1530	84.2
9	L065	1.5860	0.0958	0.1077	78.4
10	L066	1.8186	0.0258	0.0558	79.9
11	L067	2.0512	0.0049	0.0269	52.8
12	L068	2.2837	0.0010	0.0178	56.2
13	L069	2.7488	0.0001	0.0094	51.1

Table 5(a) Jet seeding ($x/d=50$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L104	−0.0239	0.9993	0.2865	49.5
2	L105	0.0957	0.9852	0.2890	49.4
3	L106	0.2153	0.9617	0.2884	52.2
4	L107	0.3349	0.9167	0.2969	50.0
5	L108	0.4545	0.8649	0.3004	57.6
6	L109	0.5742	0.8002	0.3001	50.1
7	L110	0.6938	0.7245	0.3018	49.5
8	L111	0.8134	0.6589	0.2962	45.4
9	L112	0.9330	0.5854	0.2885	38.8
10	L113	1.0526	0.5071	0.2814	38.9
11	L114	1.2919	0.3661	0.2582	27.5
12	L115	1.5311	0.2398	0.2408	19.2
13	L116	1.7703	0.1313	0.2064	10.1
14	L117	2.0096	0.0445	0.1655	3.6
15	L118	2.2488	−0.0153	0.1106	1.1
16	L119	2.4880	−0.0052	0.0497	0.5
17	L120	2.9665	0.0021	0.0220	0.2

Table 5(b) External seeding ($x/d=50$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L154	−0.0239	0.9645	0.2873	69.6
2	L155	0.0957	0.9485	0.2907	69.6
3	L156	0.2153	0.9157	0.2911	84.0
4	L157	0.3349	0.8685	0.2908	82.3
5	L158	0.4545	0.8093	0.2933	102.1
6	L159	0.5742	0.7406	0.2924	110.3
7	L160	0.6938	0.6683	0.2911	98.3
8	L161	0.8134	0.5972	0.2864	109.1
9	L162	0.9330	0.5249	0.2802	120.0
10	L163	1.0526	0.4643	0.2695	85.2
11	L164	1.2919	0.3266	0.2496	98.4
12	L165	1.5311	0.1553	0.1891	103.8
13	L166	1.7703	0.0131	0.0594	77.3
14	L167	2.0096	−0.0053	0.0438	107.4
15	L168	2.2488	−0.0019	0.0273	140.4
16	L169	2.4880	−0.0036	0.0229	105.8
17	L170	2.9665	−0.0001	0.0178	134.9

Table 6(a) Jet seeding ($x/d=100$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L 204	−0.0379	0.9946	0.3185	29.1
2	L 205	0.0379	0.9999	0.3150	32.6
3	L 206	0.1136	0.9837	0.3180	36.3
4	L 207	0.1894	0.9708	0.3225	37.5
5	L 208	0.3409	0.9177	0.3200	37.7
6	L 209	0.4924	0.8412	0.3267	36.4
7	L 210	0.6439	0.7650	0.3292	32.7
8	L 211	0.7955	0.6705	0.3257	27.5
9	L 212	0.9470	0.5648	0.3188	24.4
10	L 213	1.0985	0.4674	0.3114	22.0
11	L 214	1.2500	0.3859	0.2987	18.0
12	L 215	1.4015	0.2983	0.2853	13.5
13	L 216	1.5530	0.2108	0.2600	8.8
14	L 217	1.7045	0.1295	0.2402	5.1
15	L 218	1.8561	0.0544	0.1996	2.7
16	L 219	2.1591	−0.0192	0.1115	0.6
17	L 220	2.7652	0.0017	0.0406	0.3

Table 6(b) External seeding ($x/d=100$)

No.	ID	$y/y_{1/2}$	$\Delta\bar{u}/\Delta\bar{u}_m$	$\sqrt{\overline{u'^2}}/\Delta\bar{u}_m$	R(Hz)
1	L 254	−0.0379	0.9628	0.3138	25.9
2	L 255	0.0379	0.9714	0.3155	27.2
3	L 256	0.1136	0.9661	0.3184	33.0
4	L 257	0.1894	0.9385	0.3172	35.4
5	L 258	0.3409	0.8765	0.3186	46.5
6	L 259	0.4924	0.7968	0.3231	52.3
7	L 260	0.6439	0.7041	0.3183	52.0
8	L 261	0.7955	0.6179	0.3179	50.5
9	L 262	0.9470	0.5250	0.3091	54.5
10	L 263	1.0985	0.4410	0.2989	45.2
11	L 264	1.2500	0.3610	0.2853	40.1
12	L 265	1.4015	0.1982	0.2474	56.3
13	L 266	1.5530	0.0451	0.1225	138.0
14	L 267	1.7045	0.0032	0.0855	92.1
15	L 268	1.8561	−0.0159	0.0825	43.1
16	L 269	2.1591	0.0031	0.0295	92.1
17	L 270	2.7652	0.0002	0.0237	84.2