

レーザー Doppler 流速計による噴流の乱れ計測 Turbulent Measurement in a Round Jet by LDV

電力中央研究所 正 員 片 野 尚 明

電力中央研究所 正 員 田 中 伸 和

1. ま え が き

火力・原子力発電所における水中放水口からの温排水の拡散現象や高速増殖炉の炉心出口部から噴出する冷却材の流動現象等は、乱流の卓越した噴流挙動を示すことが知られている。しかし、このような噴流現象に対する包括的な乱流計測の報告は、空気噴流を対象にした計測例を除いて殆んど見当たらない。従来、水流の乱流計測に対してはホットフィルム流速計が多く用いられてきたが、検出部の安定性や高乱流の場合には方向性の分離能力にも問題があった。一方、最新の乱流計測器であるレーザー Doppler 流速計 (Laser Doppler Velocimeter : LDV) は、流体の運動を乱さない非接触型であり、高乱流でも方向成分の分離に問題がないこと、しかも本質的に較正が不必要等の利点を有する。

本研究では、水噴流内の乱流特性を把握するために、もっとも基本的で既往の研究成果が多く得られている単一円管噴流を対象にして、2成分LDVを用いて乱流計測を実施し、既往の実験結果との比較を通じて噴流内の平均流および乱流特性を検討したものである。

2. 実験装置と実験方法

図-1は噴流実験装置の概略図を示す。実験装置は大別して実験水供給部、試験水槽部、LDVおよびそのトラバース装置より構成されている。LDV測定においては、実験用水に含まれる散乱粒子の制御が必要と考えられる。そこで、本装置では粗い粒子を除去し、しかも一定の粒子濃度を保持するための濾過装置を設けた循環システムを採用している。実験水は低置水槽、ポンプ、濾過装置を通じて高置水槽、流量計、絞り管そして内径20mm、長さ51.5mmのノズルへ導かれる。絞り管は直径150mmからノズル径20mmに一致させるようにベルマウス形状に絞ったものであり、ノズルは試験水槽の底面中心部に鉛直上向きに取付けられ、その高さは水槽底面より35mmのところの位置する。試験水槽は0.9m×0.9m×1.1mの規模を有する四面ガラス張り水槽で、上部に越流部が設けてある。越流水は排水管を通じて再び低置水槽へ戻され、全体として循環システムが構成されている。

トラバース装置はLDVの入射光学系と受光光学系とを一体で移動できるように工夫されている。しかし、受光系側は片持梁となっているためトラバース時の振動が懸念され、安定性の確保を図るために簡易な振れ止め部を設けた。トラバースの移動範囲は前後、左右方向に±250mm、上下方向に最大700mmであり、それぞれの位置の精度は0.1mmとなっている。

図-2は、本実験に用いたDISA、55Xシステムの光学系と信号処理系を示したものである。光学系は周波数シフト付き、2成分、2カラー、3ビーム前方散乱型であ

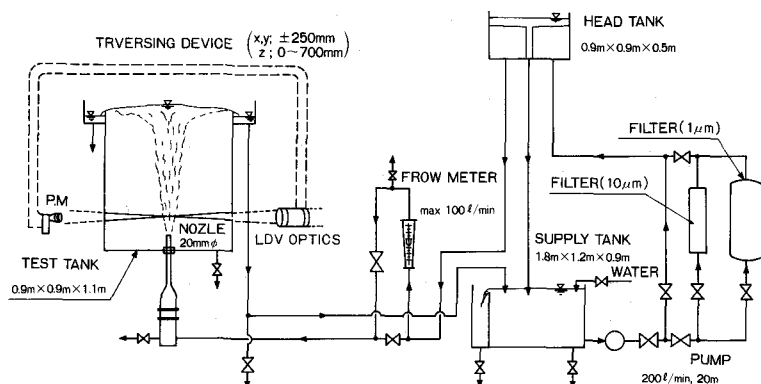


図-1 実験装置概略図

り、レーザー光源（Arレーザー、出力2W）、入射光学系および受光光学系で成り立っている。信号処理系は周波数シフター、周波数トラッカーおよびデジタル・データレコーダ等で構成されている。

データ処理は前処理、通常、処理および条件付処理に分けて実施した。前処理は正しい流速成分を算出するまでの処理過程であり、そこでは計測時のバイアスや係数の修正、トラッカーアナログ出力の誤差の修正、流速値への変換および2成分流速値の算出までが含まれる。

通常処理とは、流速変動記録をそのまま処理して平均流速、乱れ流速、レイノルズ応力およびパワースペクトル等を求める処理過程である。さらに、条件付処理は条件付抽出法に基づく処理で、流速変動記録を乱流および非乱流成分に分離して、各々の成分における平均流、乱れ流速およびレイノルズ応力を計算する過程を指す。

乱流領域と非乱流領域とを区別するための検出関数としては、通常良く用いられている加速度 ($\partial u / \partial t$) を用いる。検出関数で鋭敏化したデータに平滑化操作を施した後、適当なしきい値を設定して乱流および非乱流領域とを判別させる。こうして求めた間欠関数 I (1: 乱流領域, 0: 非乱流領域) を元の流速変動記録に掛けて乱流および非乱流領域の流速成分を算出する。

実験はノズル出口流速 0.79, 1.55 および 3.18 m/sec, レイノルズ数 $Re = 1.6 \times 10^4$, 3.1×10^4 および 6.4×10^4 の3ケースについて実施した。噴流内の流速分布を求めるために、LDV光学系をトラバース装置によって移動と固定を繰り返しながら、図-2に示した測定システムでドブラー信号を記録し、電算機処理によって2成分の平均流速、乱れ流速およびレイノルズ応力等を求めた。

ここで、以下に用いる記号を説明するとつぎの通りである。

z, y : それぞれ噴流軸およびそれに直交方向の座標, D : ノズル直径, U, V : それぞれ z, y 方向の平均流速, u', v' : それぞれ z および y 方向の乱れ流速の rms 値 ($u' = \sqrt{u'^2}, v' = \sqrt{v'^2}$), $\overline{u'}, v'$: レイノルズ応力, また添字 o はノズル端, m は噴流中心軸, t は乱流成分, n は非乱流成分である。

3. 平均流速分布

図-3は、 $Re = 6.4 \times 10^4$ におけるノズル端 ($z/D = 0.125$) における平均流速および乱れ強度分布を示したものである。平均流速分布 U_o/U_{om} は $-0.4 \leq y/D \leq 0.4$ の領域で一様分布、ノズル壁近傍では急激な低下が認められる。一方、乱れ強度分布 u'/U_{om} および v'/U_{om} はほぼ同等の大きさであり、 $-0.4 \leq y/D \leq 0.4$ の領域で0.4%と小さく、ノズル壁近傍で5~7%と急激な発達が認められる。

図-4は同様に、 $Re = 6.4 \times 10^4$ における噴流中心軸に沿う平均流速および乱れ強度の変化を示したものである。 U_m/U_{om}

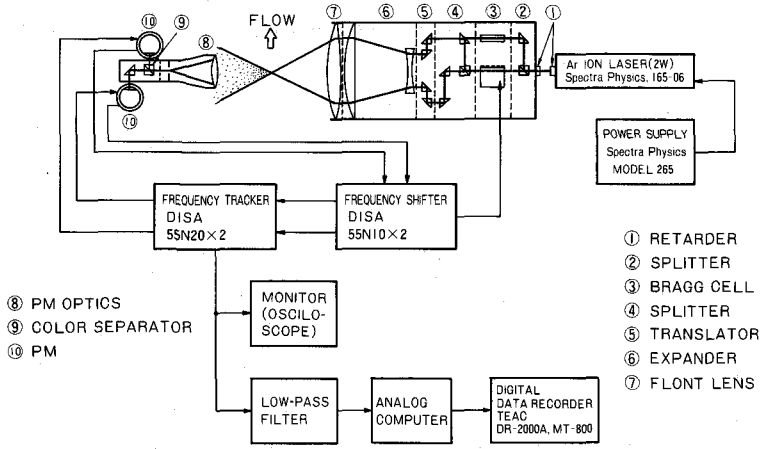


図-2 LDV測定システムブロック線図

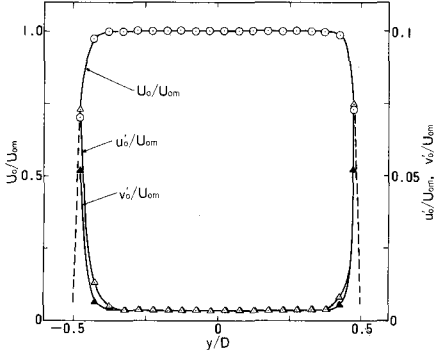


図-3 ノズル端での流速分布

または U_{om}/U_m 曲線より、 $0 \leq z/D < 4$ の領域で放流速と等しいコア部分の存在が認められ、 $z/D > 10$ になると U_m が流下距離 z に逆比例する領域に到達していることが認められる。

図-5 は、ノズル端でのレイノルズ数を変化させた場合の $(z+z_0)/D$ 対 U_{om}/U_m および b_{05}/D の変化を示したものである。図中の直線関係はそれぞれ次式で示される。

$$\frac{U_m}{U_{om}}=6.0\left(\frac{z+z_0}{D}\right)^{-1} \quad \cdots (1)$$

$$\frac{b_{05}}{D}=0.085\left(\frac{z+z_0}{D}\right) \quad \cdots (2)$$

ここに、 z_0 は仮想原点の長さであり、レイノルズ数に依存する。

式(1)の係数 6.0 は古典的なAlbertson (1950) の 6.2 にくらべてやや小さいが、Wynagnanski & Fiedler (1967) の 5.7 ($z/D > 60$) や初期領域 ($z/D < 12$) を対象にしたBoguslawski & Popiel (1979) の 5.9 に比較すると若干大きくっている。

また、式(2)の係数 0.085 はRodi (1975) の得た 0.086 にほぼ一致し、Boguslawski らの値 0.080 より若干上回っている。なお、 b_{05} の流下方向の変化は仮想原点を考慮しない方が実験式との整合は良好であると認められる。

図-6 は y 方向の U/U_m 分布に関する本実験値と既往の実験値とを比較したものである。本実験結果は全体的にWynagnanski & Fiedler およびChevray & Tutu (1978) の測定結果と良い一致を示し、分布の裾部分で両者の中間に位置していることが認められる。

4. 乱れ強度およびレイノルズ応力分布

噴流の乱れの発達過程を詳細に検討した結果、 u'/U_{om} および v'/U_{om} 分布は $z/D=6 \sim 8$ で最

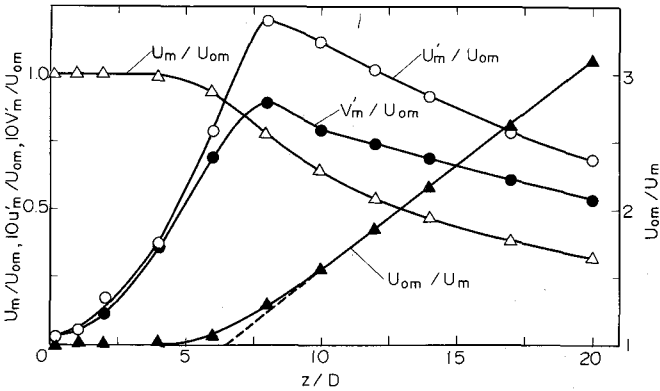


図-4 噴流軸に沿う平均流速および乱れ強度の変化

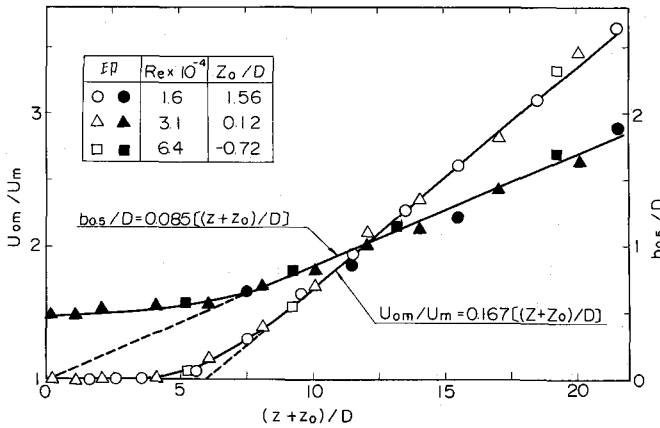


図-5 噴流軸に沿う平均流速、半値幅の変化

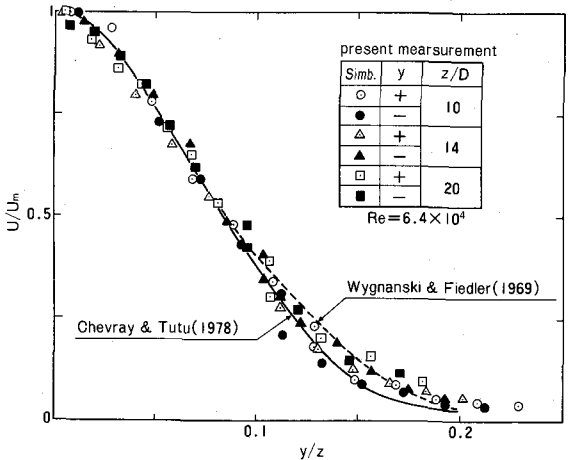


図-6 Self-preserving領域における U/U_m 分布に関する本実験値と既往の実験値との比較

大値をとり(図-4参照),以後分布幅を拡大しながら流下距離と共にそのピークは減少してゆく。最大値の生じる半径方向の位置は $y/D \div 0.5$ であり,その値は u'/U_{om} で12.5%, v'/U_{om} で9.5%である。このように,乱れ成分が最大となる距離は平均流がSelf-preserving領域に到達する距離と一致し,噴流の乱れの発達過程を知る上で興味深い。

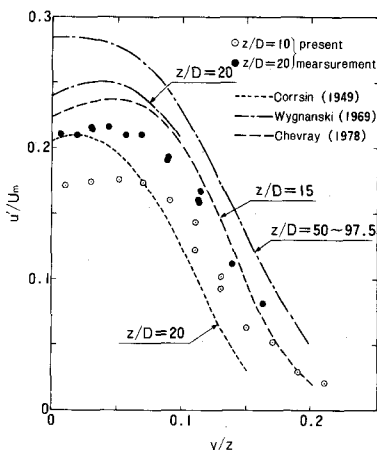


図-7 u'/U_m 分布の比較

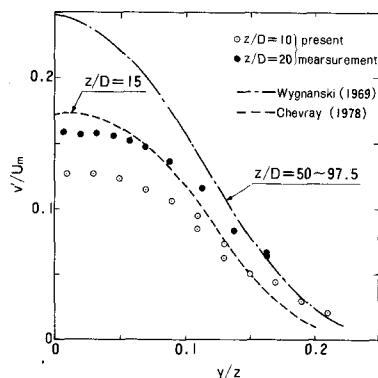


図-8 v'/U_m 分布の比較

図-7, 8および9はそれぞれ u'/U_m , v'/U_m および $\overline{u'v'}/U_m^2$ 分布に関する本実験結果と既往の実験結果とを比較したものである。これらの図より, u'/U_m および v'/U_m 分布に関しては既往の実験結果より中心軸部で小さく,裾部分で大きくなっている。 $\overline{u'v'}/U_m^2$ 分布については良好な一致が認められる。また,乱れ強度は $z/D=10$ より20において増加する傾向を示している。このことは乱れ成分がSelf-preserving領域に達していないことを意味し, Wygnanski らによれば $z/D > 50$ でその領域に到達することを報告している。

5. 条件付抽出法による平均流速分布

噴流や乱流境界層内の間欠性およびそれらの包括的な研究が, Corrsin & Kisler (1954) によって行われた。彼等の噴流を対象にした実験によれば, 噴流内で非乱流の周囲水が浸入する位置はほぼ流速の半値幅におよぶことを結論している。図-10は検出関数として $(\partial u/\partial t)^2$ を用いた条件付抽出法による間欠係数 r , 軸方向の平均流速 U_t および U_n の分布形を示す。図中の r 曲線はCorrsinらにならって半値幅 $y/z \div 0.085$ の位置で, r が1を割るようなしきい値を設定して得た結果である。

$r < 1$ の領域で U_t は U を上回り, U_n は U を下回りながら噴流外縁部で U に近づく傾向が認められる。

図-11は y 方向平均流速に対して条件付処理を施した結果を示す。実験値は

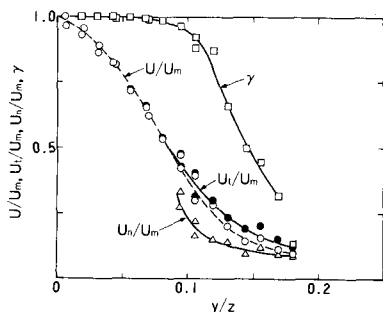


図-10 条件付平均による平均流速分布例

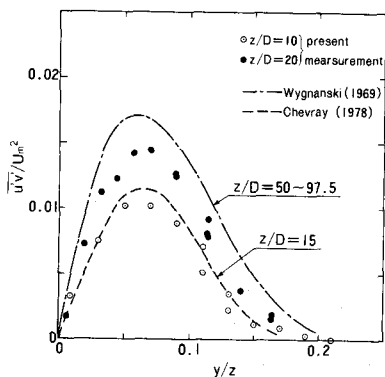


図-9 $\overline{u'v'}/U_m^2$ 分布の比較

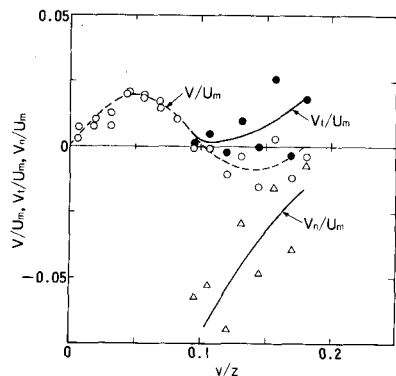


図-11 条件付平均による y 方向の平均流速分布

($z/D=20$, $Re=6.4 \times 10^4$)

散乱しているが、 V_z は噴流中心軸から外縁部に向って正の流速でやや増加するのに対して、周囲水の流速成分 V_n は噴流の外縁部から中心軸へ向って負の流速で加速されながら入ってくる傾向を示し、噴流内の定性的な混合過程を明瞭に説明している。

6. 乱れのパワースペクトル

図-12は噴流内で乱れがもっとも卓越していると推測された $z/D=8$, $y/D=0.5$ における乱れのパワースペクトルを示したものである。 u および v 成分とも0.1~10Hzの周波数帯においては、0.7~0.8Hzおよび4Hz付近に若干のピークが認められるものの、ほぼ一様レベルの領域といえる。ただし、 u 成分は v 成分にくらべて5倍程度高いレベルを有している。また、10Hz以上の高周波領域になると、 u および v 成分とも同一レベルで周波数の増加に伴って単調に減少する傾向が見られる。一方、図-13は $z/D=20$, $y/D=0$ における乱れのパワースペクトルを示したものであるが、低周波側において u 成分は0.1~1Hzでほぼ一様、 v 成分は低周波側が若干下って2~3Hzにピークを有するような形状を示す。高周波側は5Hz以上で u と v が一致し、周波数の $-5/3$ 乗則に近似して低減している。このように、噴流内の乱れの構造は、一様なパワーレベル分布を有する状態から流下距離を経るに従って高周波側から低周波側へ向ってしだいに取りくずされ、カスケード結合で乱れエネルギーをさらに高周波側へ輸送し、しだいに等方性乱流の平衡状態に近づく状況が推察できる。

7. 渦動粘性係数の推定

渦動粘性係は、 y 方向の平均流速 V が主流の U 成分にくらべて十分小さいことを考慮すると、次式で定義される。

$$\epsilon_M = \frac{\overline{u'v'}}{\partial U / \partial y} \dots\dots\dots (8)$$

図-14は、 $Re=6.4 \times 10^4$, $z/D=10$ および20における ϵ_M の分布を示したものである。 ϵ_M の分布は噴流外縁部に向って減少する傾向にあるが、間欠性を考慮した条件付平均による方が減少が少ない。式(8)は前出の式(1)を考慮すると次式のように書き表わせる。

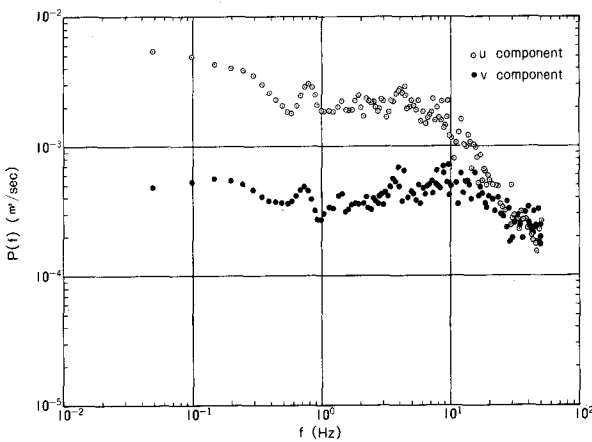


図-12 流速変動のパワースペクトラム(その1)

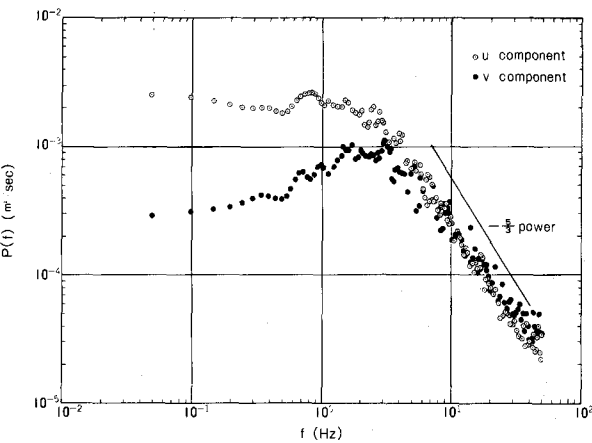


図-13 流速変動のパワースペクトラム(その2)

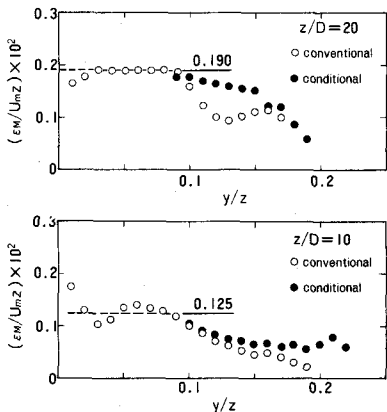


図-14 渦動粘性係数の分布

$$\epsilon_M = \frac{6 \alpha U_{om} D}{(1 + \frac{z_0}{z})}$$

..... (4)

ただし、 α は図-15の縦軸の値 $\epsilon_M/U_m z$ を表わす。

式(4)中に本実験の U_{om} 、 D および z_0/z の値を代入して ϵ_M の値を求めると表-1のようになる。表-1中には、良く知られている既往の研究成果も合わせて示してある。本実験から得られる ϵ_M の値は既往の実験式から得られる値とオーダ的に一致する結果が得られた。

表-1 渦動粘性係数の比較

研究者	実験式	ϵ_M (cm ² /sec)	Remark
本実験結果 (1982)	$\epsilon_M = 0.0118 U_o D$ ($z/D = 20$)	7.5	水, $D = 20$ mm $U_o = 3.18$ m/sec $Re = 6.4 \times 10^4$
H.Schlichting (1930)	$\epsilon_M = 0.025 U_m b$ ($\epsilon_M = 0.0128 U_o D$) ¹⁾	8.1	空気, $D = 25$ mm $U_o = 40$ m/sec $Re = 10^5$ order
B.G.Vander Hegge Zijnen (1949)	$\epsilon_M = 0.0116 U_o D$	7.4	空気 $Re = 7 \times 10^4$
Wyganski & Fiedler (1969)	$\epsilon_M = 0.23 U_m$ ($\epsilon_M = 0.028 U_o$) ²⁾	8.9	空気, $D = 26$ mm $U_o = 51 \sim 72$ m/sec $Re = 10^5$ order

1) 原式の U_m, b を本実験結果を適用して U_o, D に変換。

2) 原式の適用範囲が $z/D > 50$ のため、 $z/D = 50$ で算定。

8. む す び

単一円管噴流の乱流計測に対してレーザードブラー流速計を適用した結果、空気噴流に対する良く知られた既往の測定結果とほぼ良好な一致が認められ、本実験結果の妥当性並びに水流動を対象にした場合のLDVの有用性が認められた。しかし、条件付抽出法に関してはなお検討の余地があり、今後流れの可視化や空間的な情報によって噴流と周囲水、あるいは乱流領域と非乱流領域を明確に区分けする方法の確立が重要と考える。

なお、本研究は電力中央研究所「タンク型FBRフィージビリティスタディ」の一環として実施したものである。また、LDV計測およびデータ処理に当って多大の御協力をいただいた日本大学生産工学部副手落合 実氏並びに東京久栄株式会社 首藤 啓氏に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) レーザ流速計の基本と応用, 昭和53年度流体計測講習会テキスト
- 2) I.Wyganski and H.Fiedler, Some measurement in the self-preserving jet, J.Fluid Mech., vol 38, part 3, pp.577-612, 1969.
- 3) R.Cherry and N.K.Tutu, Intermittency and preferential transport of heat in a round jet, J.Fluid Mech., vol 88, part 1, pp. 133-160, 1978.
- 4) L.Boguslawski and Cz.O.Popiel, Flow structure of the free round turbulent jet in the initial region, J.Fluid Mech., vol 90. part 3, pp.531-539, 1979.
- 5) S.Corrison and M.S.Uberoi, Further experiments on the flow and heat transfer in a heated turbulent air jet, NACA, Technical Note, №1865, 1949.
- 6) S.Corrison and A.L.Kistler, The free-stream boundaries of turbulent flows, NACA Technical Note, №3133, 1954.
- 7) J.O.Hinze, Turbulence, Second edition, McGraw-Hill, 1975.