

二次元壁面噴流の乱流特性に関する実験的検討

Experimental Study of Turbulence Characteristics of Two Dimensional Wall Jet

(財) 電力中央研究所土木研究所 正会員 片野 尚明
 日本大学生産工学部土木工学科 " 落合 実※
 (財) 電力中央研究所土木研究所 " 守屋 祥一

1 まえがき

現在、開発されつつある高速増殖炉は、主容器直径、高さが約20 mと従来の軽水炉に較べて非常に大型化されている。その主容器内には、炉心上部構造、中間熱交換器、ポンプ、等の構造物が配置され、冷却材料として液体ナトリウムが用いられている。液体ナトリウムは、炉心出口で平均約500℃程度の高温高速噴流となり、主容器内の各種の構造物に流速および温度変動に起因した熱疲労を与えるものと考えられる。この熱疲労は、主容器および容器内構造物の設計に重大に関与することから、熱疲労の原因となる流速および温度の変動特性を解明することが重要な課題となっている。

本研究は、そのような主容器内冷却材の流動特性を解明することを窮極の目的とするものである。主容器内の冷却材の流れは、各種の容器内構造物に衝突し、そして構造物壁面を沿う流れ形態となるため、壁面に与える疲労は、その壁面に沿う流れの速度および温度変動が主因と考えられる。そこで本報告は、主容器内冷却材の流動特性を解明するための第1歩として、その流動現象を基本的な二次元壁面噴流現象に単純化し、等温度場におけるその流れ特性、特に乱れ特性を解明することを目的とする。

壁面噴流についての研究は、従来から行なわれているが、計測上の容易さから空気流体を対象として多く行なわれている。しかし、水流体を用いた乱れ量に関する計測結果は数少ない。そこで本報告は、乱れ計測に有効であるレーザードップラー流速計を用い、今まで測定が困難であった局所の流れや微弱な流れを計測し、流下方向および鉛直方向の平均流速、乱れ強度、乱れエネルギーおよび Reynolds 応力などの鉛直断面および水平断面分布について検討を行なうものである。

2 実験装置および方法

本実験に用いた装置の概略を、図-1に示す。測定水槽は、後に述べるレーザードップラー流速計 (Laser Doppler Velocimeter: LDV) を計測装置として用いるため両側面を無圧縮ガラス (10 mm厚) で製作した長さ2.3 m、高さ0.6 m、幅0.1 mのステンレス枠製二次元水槽である。噴流出口の乱れをできるだけ少なくするように整流部およびベルマウス絞り部を有する噴流発生装置を製作し、水槽に設置した。また水位は、流下端に越流堰を設け制御した。安定した流量を噴流発生装置に供給するために、高置水槽を設け、本実験装置の流路系はクローズ方式となっている。

LDVの信号は、流体中の散乱粒子径によって大きく影響を受けるため、炉過装置を設け散乱粒子径を制御し、また流路系内部の腐食によって流体中の散乱粒子に影響を及ぼさないように配管類は、塩ビ製とし噴流発生装置および越流堰は、アクリル製で、その他は、全てステンレス製として製作されている。なお、散乱粒子は、関東ローマ第8種 (平均粒径 $5\mu\text{m}$)を用いた。また実験水槽の床面は、アクリル製で十分滑面と見なしうるものである。

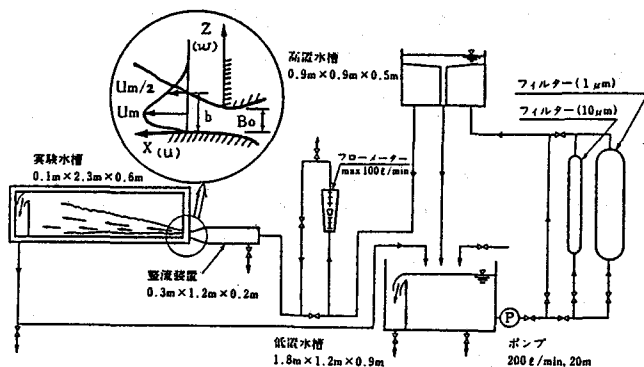


図-1 実験装置概略図

本実験に用いたLDVシステムは、図-2に示すような、DISA製、前方散乱型、差動型法LDVである。レーザー光源は、He-Neレーザー、最大出力15mwであり、光学系を介して3ビームとなり2方向流速成分が同時計測できるシステムとなっている。またレーザー光源、電源、光学系およびフォトマルは、トラバース装置（移動範囲 $X = 0 \sim 200\text{ cm}$, $Y = \pm 10\text{ cm}$, $Z = 0 \sim 60\text{ cm}$ ）に設置され、一体で移動し、 0.1 mm の精度で測点合わせが可能となっている。

データ処理システムは、図-2に示すように、散乱粒子によるレーザー光の散乱光をフォトマル（P.M.）で受光し、周波数シフターを介して、周波数トラッカから電圧出力される。その電圧をデジタルデータレコーダでオープンテープに収録し、そのテープを大型電算機（FACOM M160 電中研所有）で処理するシステムとなっている。データ収録時間およびサンプリング周波数は、それぞれ30秒～180秒および50～200Hzで、乱れの卓越した地点において計測を行ない、平均流速、乱れ強度、パワースペクトル分布が、それらによって影響されないように決定した結果、収録時間を120秒サンプリング周波数を100Hzとした。またデータ処理において、LDV特有のロックアウト信号を考慮した。なお、周囲流体に対する本実験に用いた散乱粒子の追従性は、50Hzの流速変動において99%となり、十分追従性が確保されているものと考えられる。¹⁾

実験は、噴流出口高さ $Bo=1.0\text{ cm}$ 、放出口のReynolds数 $Re = 579 \times 10^3, 1.22 \times 10^4, 1.41 \times 10^4$ として実施した。計測断面は、流下方向 $X/Bo = 0.5 \sim 55$ における鉛直断面（Z断面）とし、その断面における最大流速および半値幅地点において横方向断面（Y断面）も計測断面とした。

3 実験結果および考察

噴流出口近傍、 $X/Bo = 0.5$ における鉛直方向の流速特性を図-3に示す。図は、 $Re = 1.22 \times 10^4$ の条件におけるものであり、噴流の流下方向 X およびそれに鉛直な方向 Y の平均流速、 U および W の分布とそれらの乱れ強度、 $\sqrt{u'^2}/Um$ および $\sqrt{w'^2}/Um$ の分布を示すものである。平均流速の分布は、 $0.05 \leq Z/Bo \leq 0.9$ の範囲ではほぼ一様分布を示し、そのときの流下方向の流速は、流量から算出される断面平均流速と良く一致することが認められる。また鉛直方向の平均流速は、ほぼ零であり、流下方向および鉛直方向の流速の乱れ強度は、 $0.05 \leq Z/Bo \leq 0.9$ の範囲で一様分布形となり、その値は約1.0%程度である。

図-4に流下距離に伴う噴流の拡がり変化を示す。噴流の半値幅 b の流下距離に沿う変化は、ほぼ直線的であり放出Reynolds数が大きくなるに伴いその勾配は、わずかに大きくなる傾向が認められる。図中の直線は仮想原点を考慮した本実験結果の回帰直線であり、次式で示される。

$$b = \alpha \bar{x} \quad \dots \dots (1)$$

ここで、 $\bar{x}$ ：仮想原点を考慮した流下距離（ $X +$

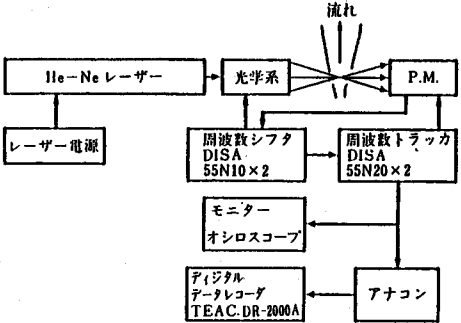


図-2 LDVシステム図

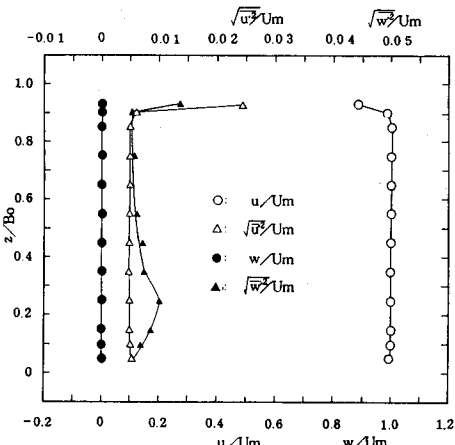


図-3 放出口流速分布

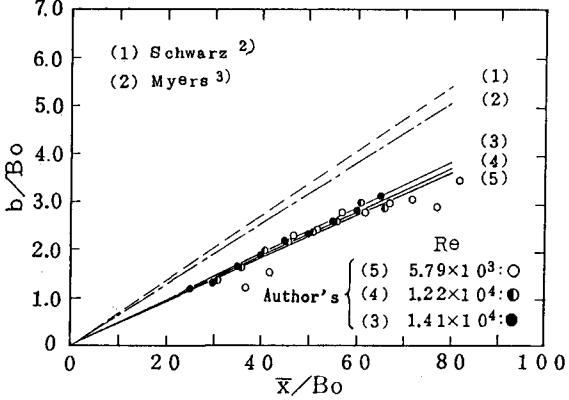


図-4 半値幅の拡がり

X_0)である。係数 α は、放出Reynolds数 $Re \approx 579 \times 10^3, 122 \times 10^4$ および 141×10^4 に対してそれぞれ0.045, 0.046および0.047となる。これらの値は、Schwarzら²⁾の結果($Re \approx 131 \sim 41 \times 10^4$)よりも小さい値となっている。

図-5は、噴流の流下距離に沿う流速の低減変化を示すもので、図中の実線は、本実験結果の回帰直線であり、次式で示される。

$$U_m/U_0 = \beta / \sqrt{x/Bo} \quad \dots (2)$$

ここで、 U_0 ：放出口平均流速、 U_m ：流下距離 x における最大平均流速である。

本実験結果から得られる式(2)の係数 β は、放出Reynolds数： Re が $579 \times 10^3, 122 \times 10^4$ および 141×10^4 に対してそれぞれ3.12, 3.19および3.52となり、 Re が大きくなるほど速度の低減が大きいたことが認められる。

この傾向はMyers³⁾の実験結果と定性的に一致している。また係数 β の値は、Rajaratnam & Subramanya⁴⁾の空気噴流を対象とした結果の $\alpha = 3.50$ とはほぼ一致している。

また、壁面から最大流速値までの距離を δ とし、境界層と混合層領域の長さスケール δ および $(b-\delta)$ の流下距離に伴う変化を図-6に示す。それらは、直線的に変化し、図中の実線は回帰直線であり次式で表わされる。

$$\delta/Bo = 0.0082(x/Bo), (b-\delta)/Bo = 0.038(x/Bo)$$

本実験の範囲では、Reynolds数による顕著な違いは認められない。

図-7は、流れの確立領域における流下方向の流速の鉛直分布を示すものである。図中の実線は、Verhoff⁵⁾の示した空気噴流の実験式であり、本実験結果と良く一致していることが認められる。また噴流の主流部の外縁においてバラツキが見られ、そして $Z/b \approx 0.2$ において $U/U_m = 1$ となることが認められる。

図-8は、噴流の流下方向の流速の乱れ強度： $\overline{u'^2}$ の鉛直分布を示すもので、放出Reynolds数 $Re \approx 122 \times 10^4$ における結果である。図は $0.8 < Z/b$

< 1.0 の範囲で、極大値を示し、この傾向は、 Re

$\approx 579 \times 10^3$ および 141×10^4 の条件においても同様であることが認められる。図-9は、噴流の流下方向に

鉛直な流速の乱れ強度 $\sqrt{\overline{w'^2}}/U_m$ の鉛直分布を示すものである。図は、放出Reynolds数 $Re \approx 122 \times 10^4$

の場合を示すもので、約 $0.9 < Z/b < 1.0$ の範囲で極大値をもつことが認められ、放出Reynolds

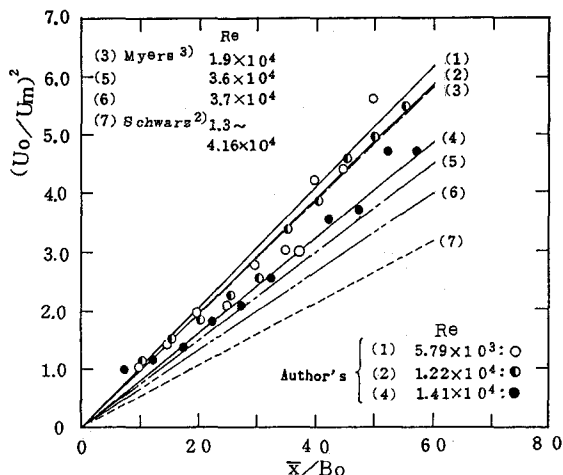


図-5 平均流速の低減

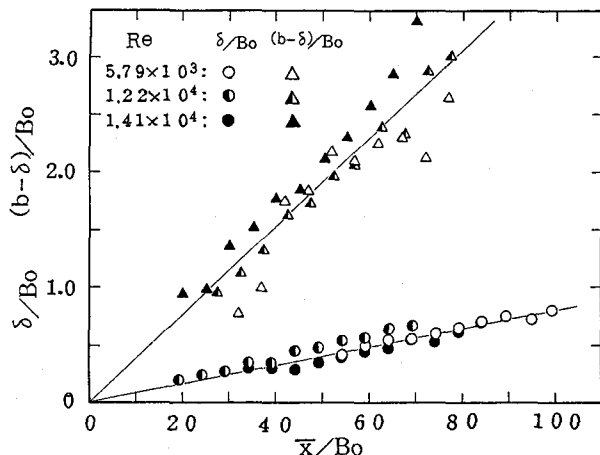


図-6 境界層及び混合層の拡がり

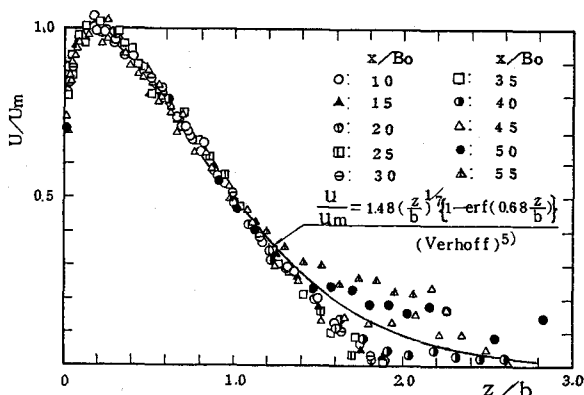


図-7 平均流速分布

図-9は、噴流の流下方向に鉛直な流速の乱れ強度 $\sqrt{\overline{w'^2}}/U_m$ の鉛直分布を示すものである。図は、放出Reynolds数 $Re \approx 122 \times 10^4$ の場合を示すもので、約 $0.9 < Z/b < 1.0$ の範囲で極大値をもつことが認められ、放出Reynolds

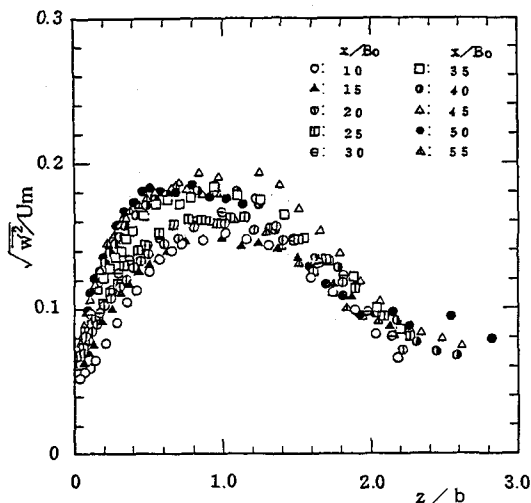


図-8 乱れ強度分布

数 $Re \approx 579 \times 10^3$ および 141×10^4 の場合においても同様に極大値をもつことが認められる。

また、その $\overline{u^2}$ および $\overline{w^2}$ の極大値と流下距離の関係を図-10に示す。図において、噴流が流下するに伴い乱れ強度 $\overline{u^2}$ および $\overline{w^2}$ の極大値は大きくなる傾向を示し、Reynolds数が 122×10^4 および 141×10^4 に対して、 $X/Bo > 45$ になるとほぼ一定値に近づくことが認められる。この値とMathieu⁶⁾らの実験結果と比較すると $\overline{w^2}$ はほぼ本実験結果と一致しているが、 $\overline{u^2}$ は、本実験結果の方が若干大きくなっている。さらにこれらの乱れ強度は、放出Reynolds数が小さいほど大きな値を示している。

図-11は、Reynolds応力の鉛直分布を無次元形 $-\overline{uw}/U_m^2$ で示したもので、放出Reynolds数 $Re \approx 122 \times 10^4$ の場合である。図は、約 $0.8 < Z/b < 1.1$ の範囲で極大値を示し、この傾向は、放出Reynolds数 $Re \approx 579 \times 10^3$ および 141×10^4 においても同様の傾向をもつことが認められる。図から、Reynolds応力が零となるときの Z/b は、約 0.1 であり、放出Reynolds数 $Re \approx 579 \times 10^3$ および 141×10^4 においても、その値とほぼ等しい Z/b になることが認められる。従って、 $-\overline{uw}/U_m = 0$ および $du/dy = 0$ となる位置は、一致せず、このことはEskinazi⁷⁾の提唱している乱れの生成項が負となる領域 (energy reversal) の存在を支持している。

乱れエネルギー K を $K = (\overline{u^2} + \overline{w^2})/2$ で定義し、その無次元形 K/U_m で整理した鉛直分布を、図-12

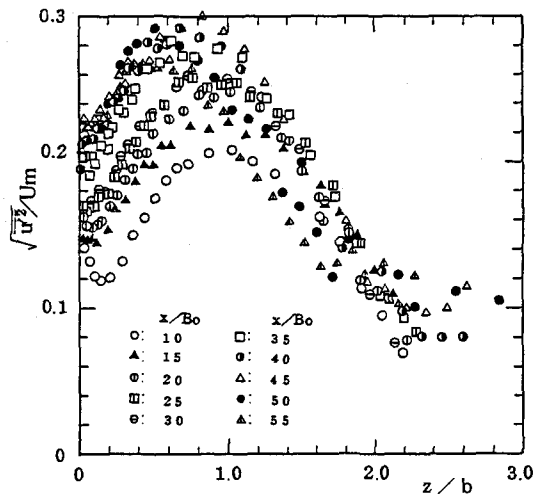


図-9 乱れ強度分布

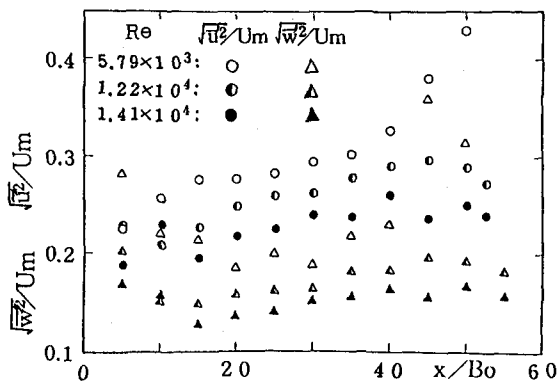


図-10 乱れ強度の変化

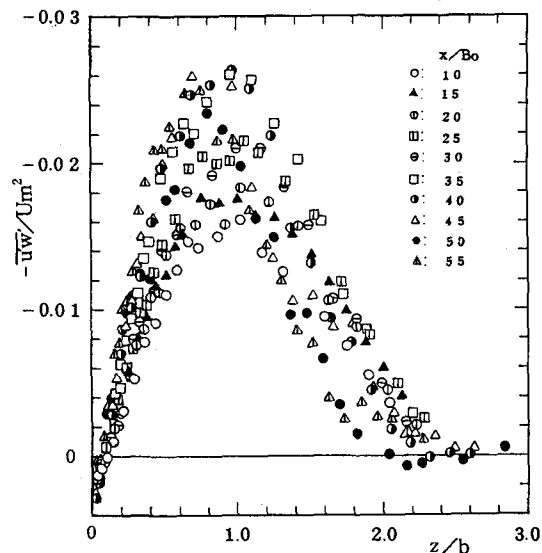


図-11 Reynolds 応力分布

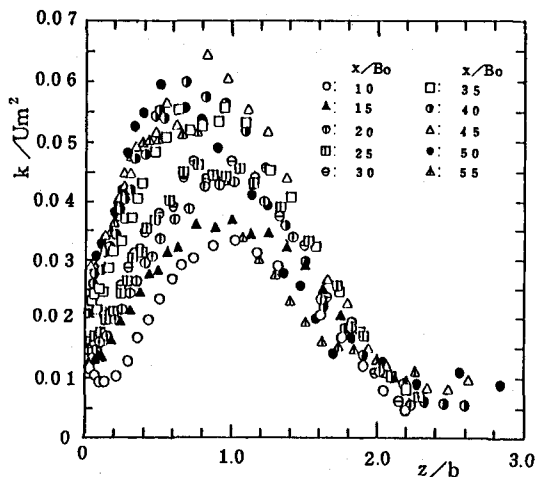


図-12 乱れエネルギー分布

に示す。図は、 $10 < X/Bo \leq 35$ の範囲において、約 $0.9 < Z/b < 1.0$ の位置で極大値をもつことが示され、他の放出Reynolds数の場合も、同様の傾向が認められる。また、 $X/Bo > 35$ における極大値は、 Z/b が $0.5 \sim 0.8$ の範囲で存在している。

図-13は、図-11および12における $-\overline{uw}$ および K の極大値と流下距離の関係を表わしたものである。噴流の流下に伴ってReynolds応力の絶対値および乱れエネルギーは増加し、放出Reynolds数が 1.22×10^4 および 1.41×10^4 に対しては $X/Bo > 35$ で一定値に漸近する傾向が見られる。なお $-\overline{uw}$ の漸近する値は、Mathieu⁶⁾ らの結果よりも大きい値となっている。また、Reynolds応力の絶対値および乱れエネルギーの値は、乱れ強度の場合と同様に、放出Reynolds数が小さくなるほど増加する傾向を示している。

図-14は、放出Reynolds数が $Re \approx 1.22 \times 10^4$ における W の鉛直分布であり、 X/Bo をパラメータとして示したものである。 X/Bo の増大とともに、鉛直方向流速 W が減少する傾向が認められる。しかし分布形の相似性は、明瞭に認めることができない。

以上は、流下方向および鉛直方向流速の鉛直断面分布を示したが、次に水平断面分布について述べる。鉛直断面分布において、流下方向流速 U が最大 U_m となる位置 ($Z = \delta$) および半値幅の位置 ($Z = b$) における水平断面の平均

流速分布をそれぞれ図-15(a)および(b)に示す。図は、流下方向および鉛直方向流速の平均流速 U/U_m および W/U_m を同時にプロットしたものである。

図-15(a)における U/U_m は、水路中央で若干凹となり側壁面より約 $2Bo$ 離れたところで凸となる分布形を示している。また W/U_m は水路全幅で一様の分布となり、側壁面近傍で若干バラツキが生じている。

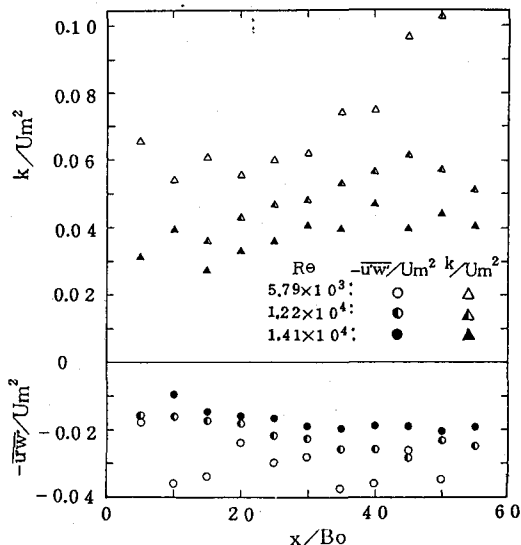


図-13 Reynolds応力および

乱れエネルギーの変化

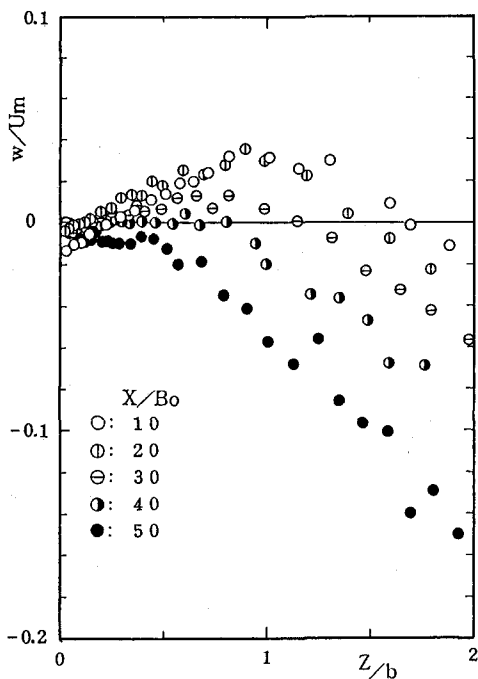


図-14 平均流速分布

図-15(b)における U/U_m の流速分布は、 $X/Bo \leq 20$ では側壁面付近を除いてほぼ一様分布を示し、 $X/Bo > 20$ になると水路中央部で凹となり側壁より約 Bo 離れた位置で極大値をもつことが認められる。その極大値は、流下距離の増加とともに大きくなる傾向があり、 $X/Bo = 50$ では中心流速の約60%程度大きい値となることが示される。また W/U_m は、壁面付近で増加する傾向を示している。

このように図-15(a)および(b)の平均流速分布は、噴流の混合領域における縦渦の存在を示唆するものと考えられる。このことは、大きいアスペクト比(最大125)で実験を行った斎藤ら⁸⁾の結果にも同様の特性が認められている。

4 まとめ

本報では、以上のようにレーザードップラ流速計を用いて、二次元壁面噴流内の流速計測を行ない、平均流速乱れ強度、乱れエネルギー、Reynolds 応力などの鉛直分布および水平断面の平均流速分布について検討を行なった。本実験結果は、空気を用いた二次元壁面噴流の既往の結果と平均流速分布においては良く一致した。しかし、乱れ強度やReynolds応力については、若干本実験結果の方が大きい値となった。また流下方向流速に対して数%程度の微弱な鉛直方向流速が測定可能となり、LDVの水噴流に対する有用性および本実験結果の妥当性が再確認された。さらに、鉛直断面および水平断面の流速分布形状から噴流の混合領域における縦渦の存在が示唆された。今後の課題としては、得られた詳細な測定結果を用いて、壁面噴流の微細な乱れ構造を明らかにするために噴流境界層の抵抗則の検討、条件付抽出を行ない、噴流の間欠性および周囲水の連行速度などの検討、そして境界層内および自由混合層内における縦渦構造の解明のための計測および可視化による検討などを行なうことが考えられる。

最後に本研究は、(財)電力中央研究所におけるタンク型FBRフィジビリティのうち三菱重工(株)との共同研究の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 高城敏美, 申鉉東, 機論400号, S54年
 - 2) Schwarz, W. H., Cosart, W., P. J. M. F., 1961
 - 3) Myers, G. E., Schauer, J. J., Eustis, R. H., Tech. Rep., 1, Department of Mechanical Engineering, Stanford Univ., 1961
 - 4) Rajaratnam, N., Subramanya, K., J. H. R. Vol. 4, 1967
 - 5) Verhoff, A., Rep. 626, Princeton Univ., 1963
 - 6) Tailland, A. et al., J. M. Vol. 6, 1967
 - 7) Eskinazi, S. Erian, The Physics of Fluids, Vol. 12, 1969
 - 8) 本名 元, 斎藤隆, 佐賀孝徳, 土木学会第38回年講, S58年
- ※ 現在, 電中研で研修中

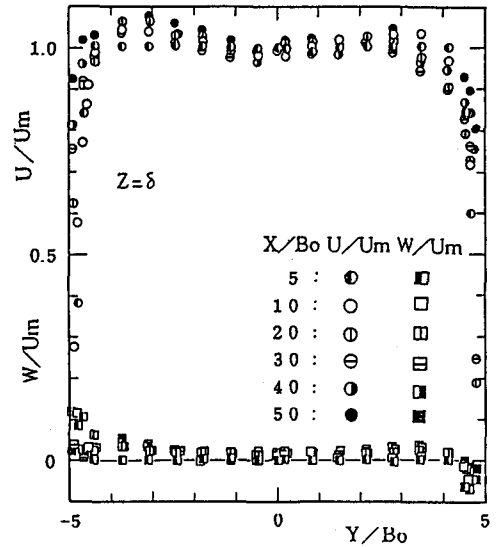


図-15(a) 平均流速分布

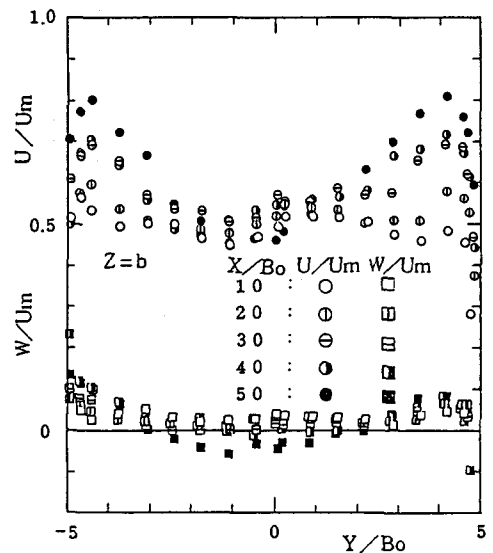


図-15(b) 平均流速分布