

博士論文

プッシュプル完全局排方式に関する基礎研究

2010年

服部 幸廣

名古屋工業大学博士論文
甲第767号(課程修了による)
平成23年3月23日授与

目次

第 1 章 序論	1
1.1 緒言.....	1
1.2 本研究の目的.....	3
1.3 本論文の構成.....	3
第 2 章 実験装置および実験方法	4
2.1.1 ノズル・フード間距離が一定の場合	4
2.1.2 ノズル・フード間距離を変化させる場合	5
2.2 漏れ限界流量比	5
2.3 熱線風速計の校正および瞬時速度測定法	7
2.4 熱線風速計の測定精度	8
2.5.1 実験条件および測定方法(実験装置①)	8
2.5.2 実験条件および測定方法(実験装置②)	8
第 3 章 プッシュプル流れの平均速度特性	16
3.1 x_I 方向平均速度	16
3.2 y_I 方向平均速度	18
3.3 噴流の中心軸上速度と半値幅	20
3.4 噴流に与える吸い込みの影響	22
3.5 第 3 章のまとめ	26
第 4 章 プッシュプル流れの乱れ特性	27
4.1 乱れの間欠性	27
4.2 x_I 方向乱れ強度	33
4.3 y_I 方向乱れ強度	33
4.4 噴流中心軸上の乱れ強度	40
4.5 レイノルズせん断応力	41
4.6 乱れの生成	42
4.7 第 4 章のまとめ	45

第 5 章 流れ特性に及ぼすノズル・フード間距離の影響	46
5.1 フード近傍の平均速度	46
5.2 噴流の中心軸上速度と半値幅	46
5.3 ノズル・フード間の流量変化および変化率	49
5.4 噴流中心軸上の乱れ強度	51
5.5 フード近傍の乱れ強度	52
5.6 レイノルズせん断応力	56
5.7 第 5 章のまとめ	60
第 6 章 結論	61
参考文献	64
謝辞	66

記号

- $2B_i$: 開口部の縦幅
 $b_{1/2}$: x_1 方向速度分布の半値幅
 $2F_i$: 開口面の縦幅
 K_L : 流量比 $= Q_2 / Q_1$
 K_{L0} : 漏れ限界流量比 $= Q_{2c} / Q_1$
 L : ノズル開口面からフード開口面までの距離
 P_{11} : x_1 方向のレイノルズ応力の生成項
 P_{22} : y_1 方向のレイノルズ応力の生成項
 Q : ノズル・フード間の任意測定断面の流量
 Q_j : 空気流量 (20℃, 標準大気圧)
 Q_{2c} : 漏れ限界流量
 R_{e2B1} : 噴き出し流れのレイノルズ数 $= 2B_1 U_1 / \nu$
 U_1 : ノズル出口流速
 u : x_1 方向瞬時速度成分
 \bar{u} : x_1 方向平均速度成分
 u' : x_1 方向瞬時変動速度成分
 \bar{u}_m : 噴流中心軸上の x_1 方向平均速度
 $\sqrt{u'^2}$: x_1 方向の乱れの実効値
 \bar{U}_3 : フード開口断面平均流速
 $\overline{u'v'}/\bar{u}_m^2$: レイノルズせん断応力
 v : y_1 方向瞬時速度成分
 \bar{v} : y_1 方向平均速度成分
 v' : y_1 方向瞬時変動速度成分
 $\sqrt{v'^2}$: y_1 方向の乱れの実効値
 $2W_i$: 開口部の横幅
 (x_1, y_1, z_1) : (噴流軸方向, 鉛直方向, スパン方向),
 ノズル開口部の中央に原点を置く座標系
 x_3 : フード開口面の中央に原点を置き, ノズル中央に向かう座標 ($= L - x_1$)
 ϕ : 流れが水平方向となす角度

γ : 間欠係数
 $(\overline{\quad})$: 時間平均量

添え字

i : 1 はノズル, 3 はフードを表す

j : 1 はノズルからの噴き出し, 2 は噴流周囲からの誘引, 3 はフードへの
吸い込みを表す

第 1 章

序論

1.1 緒言

アーク溶接や融解金属の鋳込み作業などで発生する金属ヒュームのような人体に有害なガスは、その発生の局所で完全に除去・排出することが作業者の環境保全のために必須のことである。その方法として従来はフードが多用されていたが、最近ではプッシュプル局排装置の使用が推奨されている。現在用いられているプッシュプル局排装置は、アスペクト比が 1~2 程度の開口断面形状ノズルから噴き出す気流とフードによる吸い込み流れを組み合わせている。ノズル・フード間を流れる大量の気流で溶接などの作業領域全体を包み込むようにし、発生した有害ガスを下流へ運び、フードで吸引して除去する方式である。従来のプッシュプル局排装置は、このように大量の噴き出し気流を必要とするため、大型の送風機を使用しており、エネルギー消費が大きくなるという欠点がある。したがって、アスペクト比が 10 程度のノズルを用いて、噴き出し気流の縦幅を薄くすることで、使用空気量を削減した新しいプッシュプル局排装置を用いれば、省エネルギー、設備の小型化が可能である。このような換気装置の設計指針を得るためには、まず、ノズル・フード間の流れ（以下、プッシュプル流れ）の流れ構造の詳細を明らかにする必要がある。

プッシュプル局排装置に関するこれまでの研究には、林ら⁽¹⁾による流量比法と呼ばれている設計方法の研究がある。彼らは、汚染物質が完全に吸い込みフードに吸い込まれる場合、吸い込み風量がノズルから噴出する風量と噴流周囲から誘引される汚染物質を含んだ空気量の合計で与えられなければならないと考えた。そして、噴き出し空気の流量に対する誘引空気流量の比の限界値を漏れ限界流量比と名づけ定義した。また噴き出し部のフランジ幅、吸い込み部のフランジ幅、噴き出し口から吸い込み口までの距離など、種々の装置形状の寸法と漏れ限界流量比の関係を流れの可視化法により実験的に求めた。しかし、プッシュプル流れの流れ構造に関しては調査していない。また、鋳込み作業時の金属ヒュームの除去⁽²⁾、メッキ作業などで発生する有害ガスを遮断するための気流の流れ⁽³⁾について、若干の研究があるが、いずれの研究も流れの詳細は明らかでない。

新しいプッシュプル局排装置では、平面噴流とフードによる吸い込み流れが併用される。フードによる吸い込みに関する研究では、新津ら⁽⁴⁾や山口ら⁽⁵⁾による 2 次元開口まわりの流れの研究がある。フードの吸い込みによる有害ガスの除去・回収は、フードから上流に向かって、フード開口高さと同程度の距離以内でのみ有効であり、これより上流では、除去・回収が難しいという欠点がある。また、これらの吸い込み流れはここで対象としている乱流ではなく非乱流である。また、プッシュプル流れに近いものにエアカーテンの流れがあり、これに関する研究としては、新津ら⁽⁶⁾や斎藤ら⁽⁷⁾の研究がある。しかし、エアカーテンは、空気噴流の幕をつくり、これで噴流両側の空気を遮断する装置であり、汚染物質飛散の局所的な防止が主な目的である。また、噴き出し口から吸い込み口までの無次元距離 $L/2B_1$ が 50 程度と、プッシュプル局排装置に比べて非常に長いので、プッシュプル流れの流れ特性と大きく相違すると考えられる。

一方、プッシュプル局排装置の噴き出し気流に利用される乱流平面噴流に関する研究は多く見られ、静止空気中に噴出する場合の代表的な研究として、Gutmark⁽⁸⁾や Brudbury⁽⁹⁾、Heskestad ら⁽¹⁰⁾が基本的な乱れ特性、乱流エネルギーの収支について報告している。しかし、これらの研究は自己保存性が成立する完全発達領域の乱流構造に関するものである。

以上のように、未発達領域の 2 次元噴流とフードにおける吸い込み流れが組み合わさった乱流に関する詳細な研究がなされておらず、新しいプッシュプル局排装置を設計するために必要な流れに関する基礎資料が得られていない。

1.2 本研究の目的

本研究の目的は、噴き出し気流の層が薄い 2 次元噴流と、フードによる吸い込み流れを併用した新しいプッシュプル完全局排装置の設計指針を得るため、プッシュプル流れの基本的特性を明らかにすることである。そのためには、プッシュプル流れの平均速度、乱れ強度、乱れの間欠性、レイノルズせん断応力、ノズルからフードに向かうプッシュプル流れの流量およびその変化率（エントレインメント速度）などの流れ特性の詳細を明らかにすることが重要である。これらの流れ特性は、ノズルからの噴き出し流量に対するフードでの吸い込み流量の比（以下、流量比）およびノズル・フード間距離の影響を受ける。そこで、本研究では、以下の三つの事項について明らかにすることを目的とする。

（１）漏れ限界流量比よりも小さい流量比の場合と、それよりも大きい場合のそれぞれについて、プッシュプル流れの平均速度場の特性に及ぼす流量比の影響の解明。

（２）それに関連した重要な問題である乱れ特性として、乱れ強度、レイノルズせん断応力、乱れの間欠性を取り上げ、これらの流れ方向の変化を調べ、吸い込みがどのようにプッシュプル流れの乱れ構造に影響するのか、また、静止空気中に噴出する 2 次元噴流とどのように相違するかについての解明。

（３）ノズル・フード間距離（ L ）を、ポテンシャルコア領域を含む短い距離、未発達領域を含む距離、そして、完全発達領域を含む長い距離の 3 種類とし、それぞれの L での漏れ限界流量比で運転（最小エネルギーで運転）した場合における流れ特性の相違の解明。

1.3 本論文の構成

本論文は全 6 章から構成されている。第 1 章では本研究の背景および目的について述べた。第 2 章では実験装置および実験方法について説明した。第 3 章では流量比がプッシュプル流れの平均速度場の特性に及ぼす影響について明らかにし、第 4 章ではプッシュプル流れの乱れ特性として、乱れ強度、レイノルズせん断応力、乱れの間欠性を取り上げて、吸い込みがどのようにプッシュプル流れの乱れ構造に影響するのか、また、静止空気中に噴出する 2 次元噴流との相違について明らかにした。第 5 章ではノズル・フード間距離（ L ）を変化させ、それぞれの L での漏れ限界流量比で運転（最小エネルギーでの運転）した場合、ノズル・フード間の流れ特性にどのような影響が表れるのか、また、2 次元噴流とどのように相違するかについて明らかにした。第 6 章は結論であり、本研究で得られた結果の総括を述べた。

第 2 章

実験装置および実験方法

2.1.1 ノズル・フード間距離が一定の場合

図 2.1 に本研究で用いた実験装置の全体図を示す。風洞内で整流された空気が、ノズル開口から噴き出し、周囲の空気を誘引しながら下流に向かいフード開口に吸い込まれる。ノズルから噴き出す平面噴流の流量はバルブ 1 の開度により調節され、オリフィス 1 (JIS 規格^(1 1)) に従い作製したコーナータップオリフィス) で質量流量 Q_1 が測定される。噴流周囲からの誘引空気流量はバルブ 2 で調節され、オリフィス 2 でその質量流量 Q_2 が測定される。また、ブロアー 1 の出口空気温度はブロアーによる圧縮仕事により上昇するので、この吐出空気を熱交換器で冷却して、プッシュプル流れの速度測定場の温度と室温との温度差が $\pm 1.0^\circ\text{C}$ 以内の等温場となるようにした。

図 2.2 (a) は、図 1 中のノズル・フード間の速度測定部の図であり、主な寸法を表 1 に示す。また、図 2.2 (b) は速度測定位置 ($z_I = 0\text{mm}$) での断面図である。ノズルから噴き出す噴流が上下に対称な平均速度分布形になるように、ノズル開口部先端には水平で短い 2 次元流路が設置されている^(1 2)。図に見られるようにノズルにはフランジがなく、フード開口部には木製のフランジが設けられている。このフランジは約 100mm の厚みがあり、フード開口付近 ($x_I = 487, 535, 600\text{mm}$) の測定時に熱線プローブがフード側面から挿入できる構造になっている。また、ノズル開口から上流に向かうガイド板と、ノズル開口からフード開口の間にアクリル製の側板を設け、流れが 2 次元的になるように工夫されている^(1 2)。このアクリル板には表 3 に示した測定位置 ($x_I = 0, 110, 206, 302, 396\text{ mm}$) にスリットが設けてあり、測定用の熱線プローブがアクリル板の側面から挿入できる構造になっている。また、ノズル・フード間の上部および下部は開放されている。座標 (x_I, y_I, z_I) の原点は、図 2.2 (a) に示すようにノズル開口面中央にとられている。ここで x_I 軸はそこからフード開口面中央に水平に向かう噴流中心軸と一致する座標、 y_I 軸は鉛直上向きの座標、 z_I 軸はスパン方向の座標である。ノズル開口面からフード開口面までの距離 L は 600mm ($L/2B_1 = 15.6$) である。

2.1.2 ノズル・フード間距離を変化させる場合

2.1.1 で説明した実験装置（以降実験装置①と表す）は、ノズル・フード間距離を変化させることが困難であるため、ノズル・フード間距離を変化させることが可能な実験装置（以降実験装置②と表す）を新たに作製した。装置の寸法はすべて実験装置①の 0.6 倍のスケールとし、相似形状となるようにした。熱線プローブはノズル・フード間にある両側板の上下開放部の下から挿入する。実験装置の主な寸法を表 2 に示す。なお、実験時のノズル・フード間距離 L は 184mm ($L/2B_1 = 8$), 391mm ($L/2B_1 = 17$), 618mm ($L/2B_1 = 26.9$) とした。

2.2 漏れ限界流量比

図 2.3 はノズル・フード間に見られるプッシュプル流れを模式的に示したものである。ノズルから噴き出した噴流と噴流周囲から誘引される空気とがプッシュプル流れ中で混合する。この流れ場が等温状態であるとすれば、噴き出し流量 Q_1 ，誘引流量のうちフードに入った流量 Q_2 ，吸い込み流量 Q_3 の間には式 (2.1) が成立する。

$$\begin{aligned} Q_3 &= Q_1 + Q_2 = Q_1 (1 + Q_2 / Q_1) \\ &= Q_1 (1 + K_L) \end{aligned} \quad (2.1)$$

ここで $K_L = Q_2 / Q_1$ である。以下に示す Q_1 ， Q_2 ， Q_3 はすべて温度が 20 °C，圧力が標準大気圧の状態に換算して整理されている。

今、 Q_1 が一定値で、 Q_3 を 0 から徐々に増加させていった場合の気流の流れを考えてみる。 Q_3 / Q_1 がある値以下、すなわち、 $Q_3 / Q_1 < 1 + K_{L0}$ の場合には、図 2.3 に示すように、プッシュプル流れの外縁部がフードのフランジに衝突するので、漏れが生じる（図中の太い実線で示す）。一方、 Q_3 が大きくなり $Q_3 / Q_1 > 1 + K_{L0}$ の場合には、プッシュプル噴流の全部が完全にフードに吸い込まれ外部への漏れが生じない（図中の細い実線で示す）。両者の限界にあたる $Q_3 / Q_1 = 1 + K_{L0}$ の場合が存在する（図中の破線で示す）。この K_{L0} が漏れ限界流量比である⁽¹⁾。すなわち、漏れ限界流量比はノズルから噴き出した気流と誘引空気とがフードに完全に吸引される場合における、誘引流量の最小値 Q_{2c} と噴き出し流量 Q_1 との比 Q_{2c} / Q_1 として定義されている。したがって、漏れがない吸い込み流量の最小限界値 Q_{3c} は、 K_{L0} を用いて式 (2.2) のように表すことができる。

$$Q_{3c} = Q_1 (1 + Q_{2c} / Q_1) = Q_1 (1 + K_{L0}) \quad (2.2)$$

林らはこの漏れ限界流量比 K_{L0} を求めるために、フードにおける気流の漏れの有無を次のように判別した。ノズルから線香の煙で可視化した気流を噴出させ、フードで吸い込む。このときフードでの漏れの有無を側面方向から写真撮影した画像で判別するのである。そして、ノズルとフードの諸寸法を変化させて測定を行い漏れ限界流量比 K_{L0} を求める式 (2.3) を導いた⁽¹⁾。

$$K_{L0} = \left(L / 2B_1 \right)^{1.1} \left\{ 0.46 \left(2F_3 / 2B_1 \right)^{-1.1} + 0.13 \right\} \left\{ 0.04 \left(2F_1 / 2B_1 \right)^{0.2} + 0.51 \right\} \quad (2.3)$$

また、林らはこの K_{L0} はノズルとフードの寸法形状比が同じであれば、噴き出し流れのレイノルズ数 $(2B_1 U_1 / \nu)$ に依存しないことを実験により示した。図 2.4 中に式 (2.3) の結果を破線で示す。

一方、本実験での K_{L0} の測定は Q_1 を一定に保ちつつ、フード開口に漏れがある状態から Q_3 を増し、これにより Q_2 を増大させる。この時、漏れの有無の判別は、フード開口部の上端と下端で発煙管の煙がフードに完全に吸い込まれるか漏れるかを目視で観察し、 Q_2 の限界値 Q_{2c} を測定し K_{L0} の値を求めた。発煙管から発生する煙を用いて、フードでの気流の漏れの有無を判別した結果の一例を図 2.5 (a), (b) に示す。

図 2.4 にノズル・フード間距離が一定の場合の測定に用いた実験装置①の漏れ限界流量比 $K_{L0} = Q_{2c} / Q_1$ と噴き出し流れのレイノルズ数 Re_{2B1} の関係を示す。バラツキがあるものの、林らと同様 Re_{2B1} の変化に対し K_{L0} がほぼ一定の 0.88 が得られた。これは林らが流れの可視化で得た $K_{L0} = 1.26$ と異なっている。これは、林らの実験装置と本実験装置のノズルとフードの寸法形状比が異なるためである。(林らのノズルとフードの寸法形状比は、ノズル開口のアスペクト比=2.5, $2F_1/2B_1=80$, $2B_3/2B_1=2$, $2F_3/2B_1=10$, $L/2B_1=10$ であり本実験装置①②のノズル開口アスペクト比=10.4, $2B_3/2B_1=5.2$, $2F_3/2B_1=15.5$, $2F_1/2B_1=1$, $L/2B_1=15.5$ とは異なる)

図 2.6 にノズル・フード間距離を変化させた場合の測定に用いた実験装置②のノズル・フード間距離と漏れ限界流量比 K_{L0} の測定結果を示す。なお、図中の実線は式 (2.3) に示す林ら⁽¹⁾の実験式に本実験装置の諸寸法比を代入して求めた漏れ限界流量比の値である。測定した漏れ限界流量比の値が、林らの実験式で求めた値より小さい。これは上述のように可視化の方法が異なること、および、林らは K_{L0} に及ぼすノズルとフードのそれぞれのアスペクト比の影響について調査していないの

で、林らの用いた噴き出しノズルのアスペクト比が 2.5、本実験装置の場合は約 10.4 と異なることが原因であると考えられる。

2.3 熱線風速計の校正および瞬時速度測定法

速度成分の測定には、カノマックス社製の定温度熱線風速計システム IHW-100、プローブは同社製の X 型熱線を使用した。熱線は長さ 2mm、直径 $5\mu\text{m}$ のタングステン線で、感知部の長さが 1mm である。なお、2 本の熱線は x_I 方向に対して $\pm 45^\circ$ 傾いている。図 2.7 に示した X 型熱線プローブを、図 2.8 のように校正風洞内に設置する。そして、熱線よりも流れの上流にある直径 13mm のノズル孔から噴き出す空気の流速 U を 0m/s から 5m/s の範囲で 1m/s ごとに変化させたときの、2 本の熱線の出力電圧 (E_a, E_b) を測定する。測定時間は 60s、サンプリング周波数は 1kHz とした。このようにして測定した風速 U と出力電圧 (E_a, E_b) の関係の一例を図 2.9 に示す。図中の曲線は測定結果を 4 次多項式で近似した校正曲線である。この各熱線の校正曲線を用いて、測定で得られた出力電圧 (E_a, E_b) からプッシュプル流れの瞬時速度 (u, v) を次のように計算する。図 2.10 は 2 本の熱線に向かって未知の風速 の気流が流れてくる様子を表している。ここに、 x_I 軸と気流の方向とのなす角を ϕ (rad) とし、これを求める。気流の熱線 a に垂直な速度成分を U_a 、気流の熱線 b に垂直な速度成分を U_b とすると ϕ (rad) は次式で求めることができる。

$$\phi = \pi/4 - \arctan(U_a/U_b)$$

また、図 2.9 の校正曲線から、出力電圧が E_a のときの速度成分 U_a 、出力電圧が E_b のときの速度成分 U_b が求まる。したがって、プッシュプル流れの瞬時速度 (u, v) は、それぞれ次式で求めることができる。

$$u = U \times \cos \phi = \sqrt{U_a^2 + U_b^2} \times \cos\{\pi/4 - \arctan(U_a/U_b)\}$$

$$v = U \times \sin \phi = \sqrt{U_a^2 + U_b^2} \times \sin\{\pi/4 - \arctan(U_a/U_b)\}$$

図 2.11 は、検定風洞内で、熱線の流れに対し $\pm 20^\circ$ の範囲内で傾けた場合（傾き角度 ϕ ）、上述の計算法で E_a, E_b から求めた u, v と実際の速度 $u = U \cos \phi, v = U \sin \phi$ を比較した図である。傾角が -20° の場合を除き両者はよく一致している。実験で測定するプ

プッシュプル流れの x_I 方向速度 U は 5m/s 以下であり、また、 x_I 軸に対する流れの角度 ϕ は $\pm 10^\circ$ 以下であるので、実験範囲内で測定精度は十分であると考えられる。

2.4 熱線風速計の測定精度

ここでは、実験装置のノズルから噴き出す質量流量をオリフィスで測定し、これを体積流量に換算した値と、熱線風速計で測定した噴き出し速度にノズル開口面積を掛けて求めた体積流量を比較し、測定系全体の精度の確認を行った。図 2.12 に両者を比較した結果を示す。回帰直線からオリフィスで測定した流量と熱線風速計から求めた流量はよく一致しており、熱線による測定精度が良いことが分かる。

2.5.1 実験条件および測定方法（実験装置①：第 3, 4 章に対応）

ノズル・フード間距離が一定 ($L=600\text{mm}$, $L/2B_1=15.6$) の場合において、漏れ限界流量比よりも小さい流量比の場合と、それよりも大きい場合のそれぞれについて、プッシュプル流れの平均速度場の特性に及ぼす流量比の影響および、乱れ特性として、乱れ強度、レイノルズせん断応力、乱れの間欠性を取り上げ、これらの流れ方向の変化を調べ、吸い込みがどのようにプッシュプル流れの乱れ構造に影響するのか、また、静止空气中に噴出する 2 次元噴流とどのように相違するかについて以下の実験条件で調査した。測定時間は 20.48s、サンプリング周波数を 1kHz とし、ノズルの中心 ($z_I=0\text{mm}$) にでの x_I - y_I 平面内における噴流速度の x_I 方向成分 u と y_I 方向成分 v をそれぞれ測定した。熱線の移動には 3 軸のトラバース装置を使用した。測定位置を表 3 に示す。ノズル・フード間距離が一定の場合、フードによる吸い込みが平面乱流噴流にどのような影響を与えるかを考察するが、漏れ限界流量比 K_{L0} が 0.88 であるので、流量比 Q_{3c}/Q_1 は $1+K_{L0}=1.88$ となる。実験では、 Q_3/Q_1 の値として、これよりも大きい 2.24 と、これよりも小さい 1.58 とした。また、噴出し流れのレイノルズ数 Re_{2B1} は 17200 とした。

2.5.2 実験条件および測定方法（実験装置②：第 5 章に対応）

ノズル・フード間距離 (L) を、ポテンシャルコア領域を含む短い距離、未発達領域を含む距離、そして、完全発達領域を含む長い距離の 3 種類とし、それぞれの L での漏れ限界流量比で運転（最小エネルギーで運転）した場合の流れ特性の相違を解明する。

測定方法は実験装置①と同様である。測定位置を表 4 に示す。実験はノズル・フード間距離を変化させ、それぞれの漏れ限界流量比で運転して行い、流れ特性を考察する。図 2.6 で示したように、漏れ限界流量比 (Q_{2c}/Q_1) の上限値がそれぞれ 0.5 ($L=184\text{mm}$)、1.4 ($L=391\text{mm}$)、2.0 ($L=618\text{mm}$) なので、 $Q_{3c}/Q_1=1+(Q_{2c}/Q_1)$ の上限値は、1.5、

2.4, 3.0 となる. 実験では Q_3 / Q_1 の値をそれぞれ 1.6, 2.5, 3.1 とした. また, 噴出し流れのレイノルズ数 Re_{2B1} は 3800 とした.

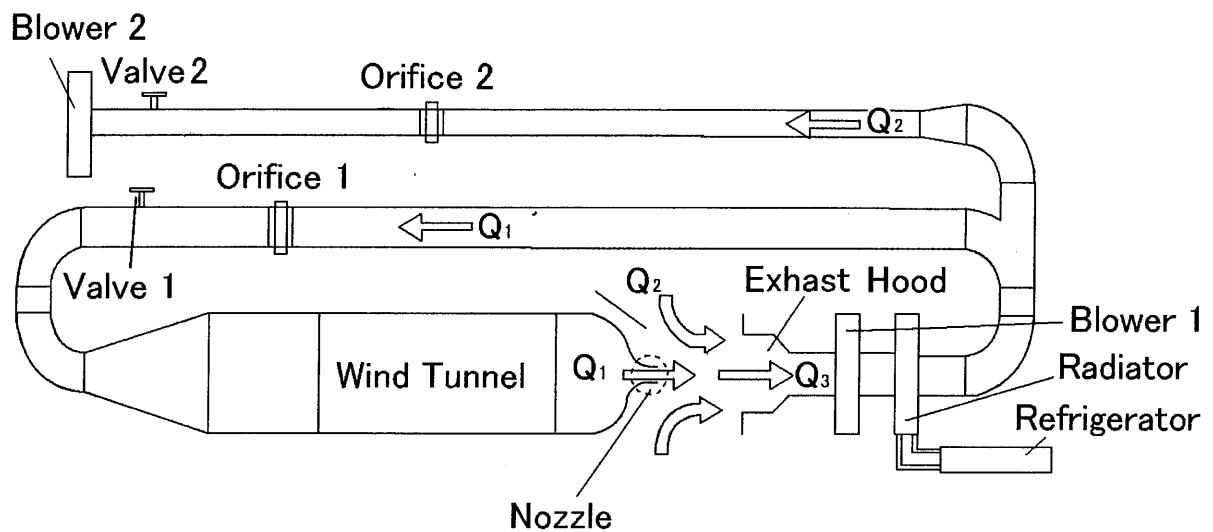


図 2.1 実験装置の全体図

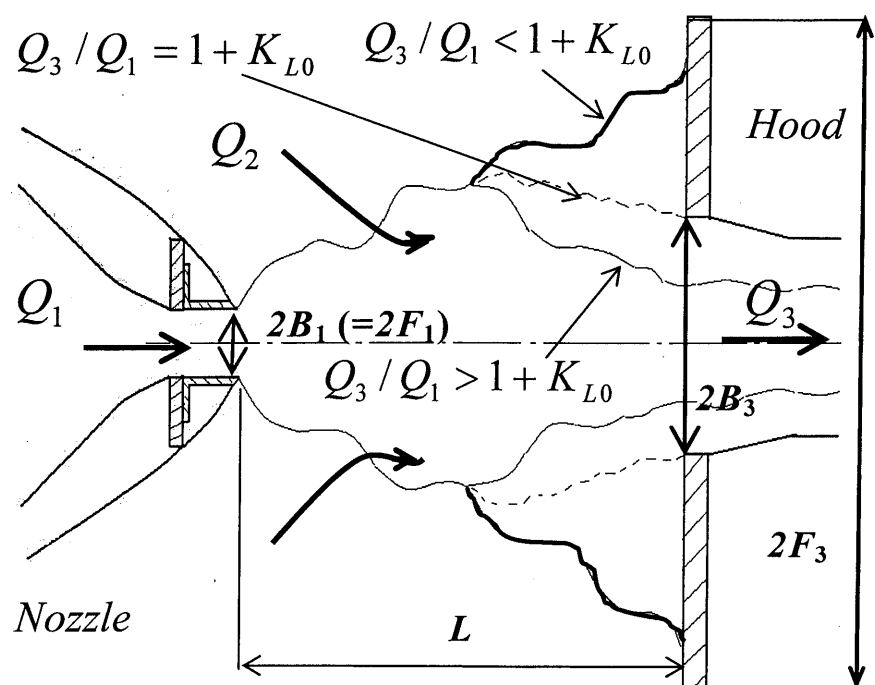


図 2.3 プッシュプル流れの模式図

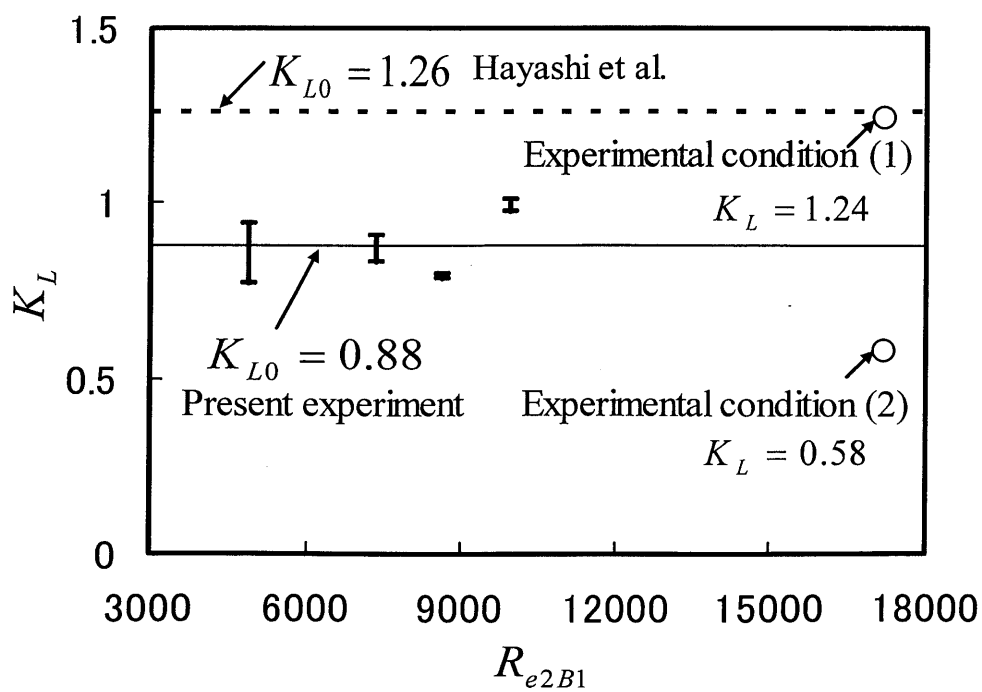


図 2.4 漏れ限界流量比と噴出しレイノルズ数の関係（実験装置①）

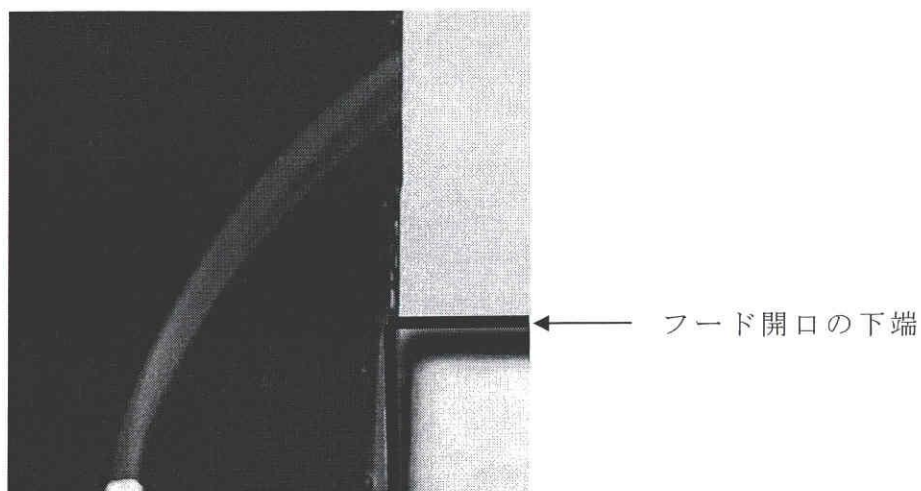


図 2.5(a) フードに漏れが無い場合 ($L/2B_1=26.9$, $K_{L0}=2.0$, $Q_3/Q_1=3.5$)

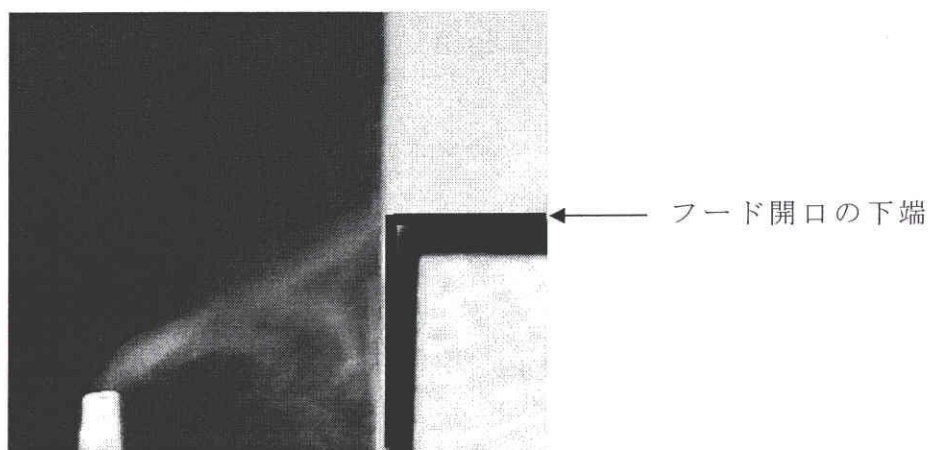


図 2.5(b) フードに漏れがある場合 ($L/2B_1=26.9$, $K_{L0}=2.0$, $Q_3/Q_1=2.0$)

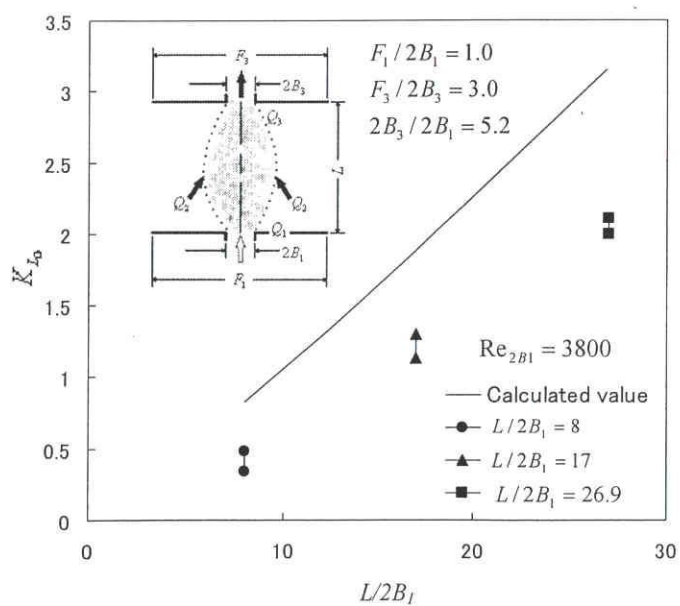


図 2.6 ノズル・フード間距離と漏れ限界流量比の関係 (実験装置②)

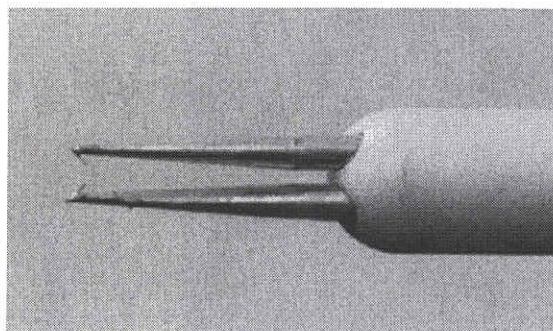


図 2.7 X型熱線プローブの実体写真

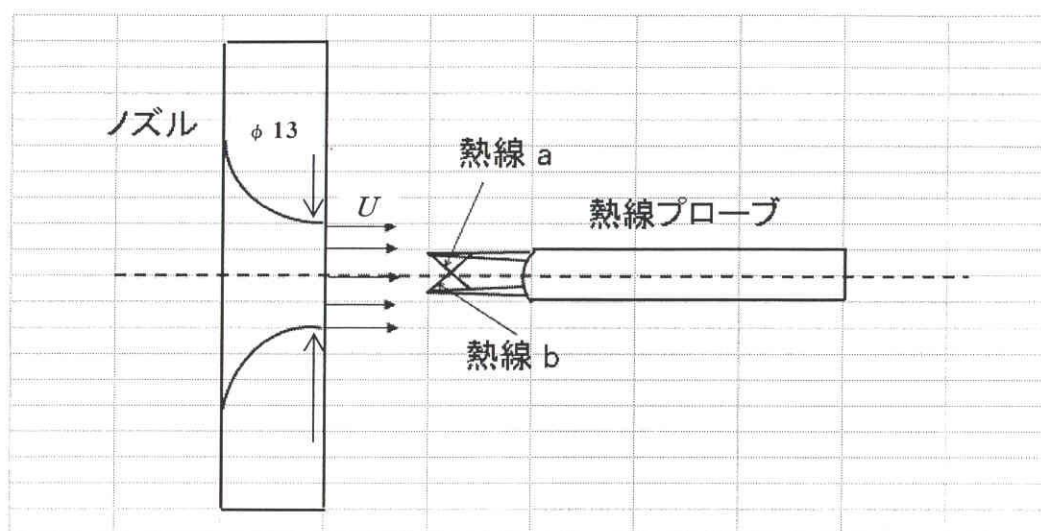


図 2.8 校正風洞による熱線の校正

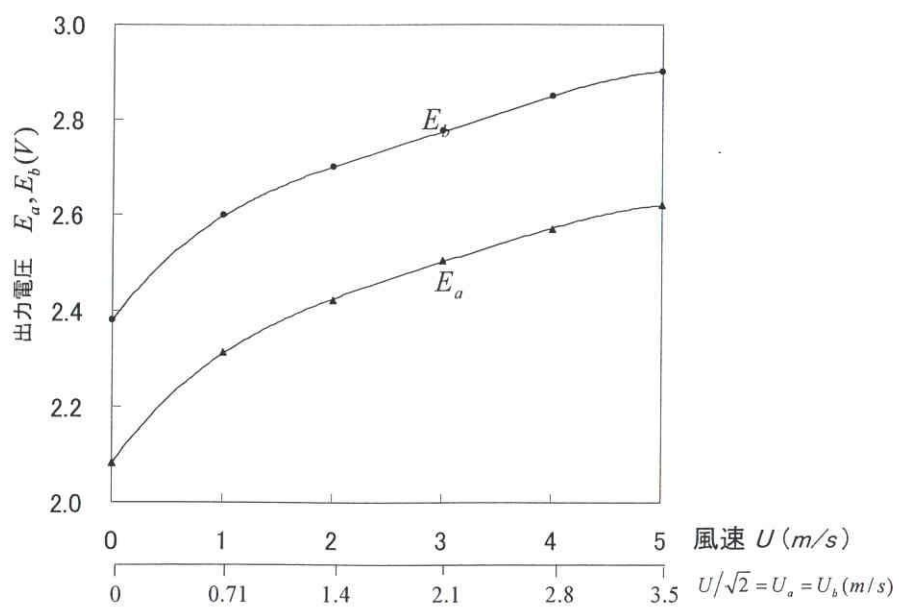


図 2.9 校正曲線

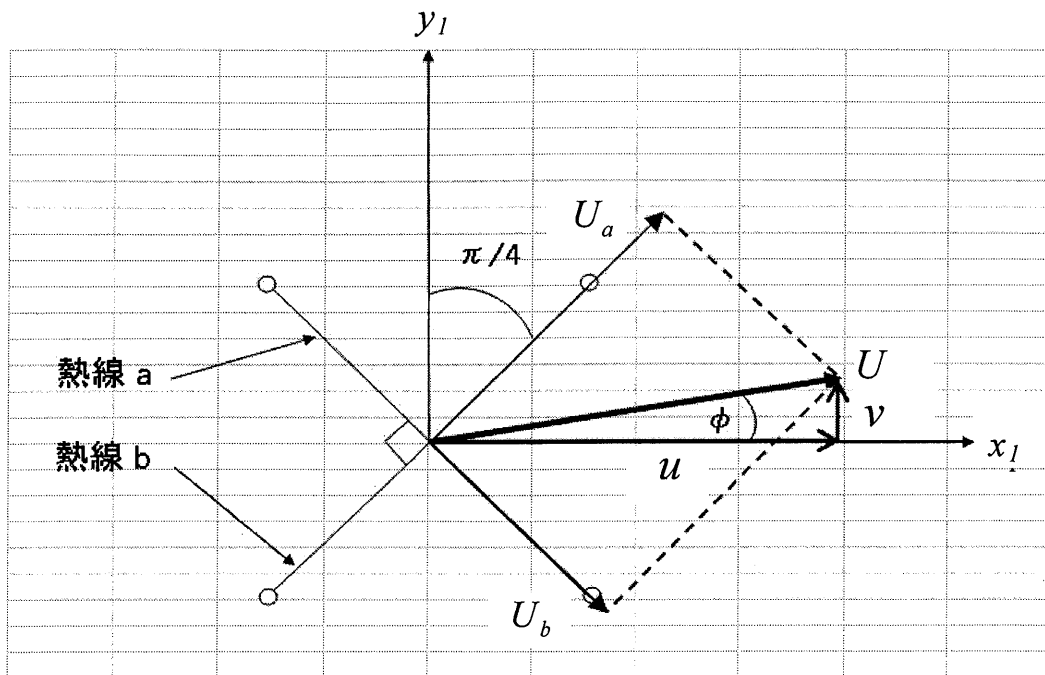
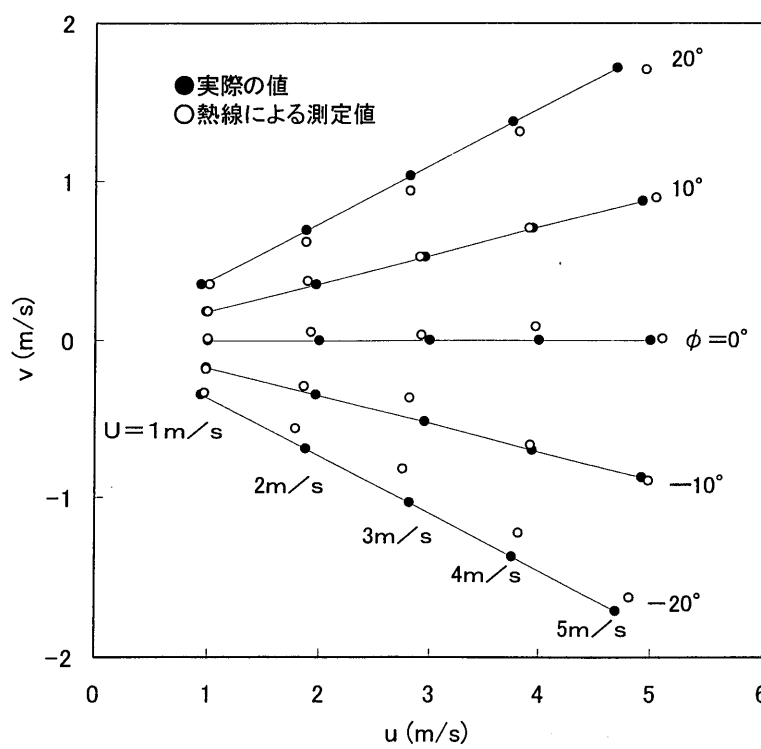


図 2.10 瞬時速度 (u, v) と热线の配置



2.11 热线に対し傾いた流れの热线測定結果と実際の流れの比較

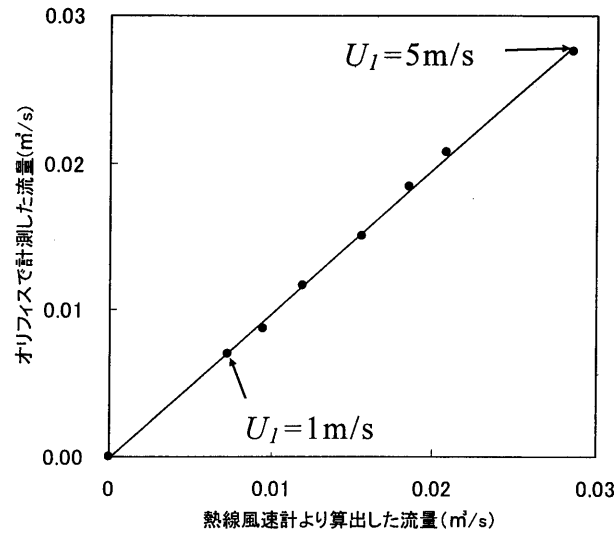


図 2.12 オリフィスおよび熱線風速計で求めた体積流量の比較

表 1 実験装置①の主な寸法

Nozzle		Hood		
$2B_1 (=2 F_1) \text{ mm}$	$2W_1 \text{ mm}$	$2B_3 \text{ mm}$	$2F_3 \text{ mm}$	$2W_3 \text{ mm}$
38.6	398	200	600	398

表 2 実験装置②の主な寸法

Nozzle		Hood		
$2B_1 (=2 F_1) \text{ mm}$	$2W_1 \text{ mm}$	$2B_3 \text{ mm}$	$2F_3 \text{ mm}$	$2W_3 \text{ mm}$
23.0	240	120	360	240

表 3 測定位置 (実験装置①)

$x_I \text{ mm}$	0	110	206	302	396	487	535	600
$x_I / 2B_1$	0	2.8	5.3	7.8	10.3	12.6	13.9	15.5
x_I / L	0	0.18	0.34	0.50	0.66	0.81	0.89	1.00

表 4 測定位置 (実験装置②)

$L \text{ mm}$	x_3 / B_3								
184	0.1	0.5	1	1.5	2	3	-	-	-
391	0.1	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6
618	0.1	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6

第 3 章

プッシュプル流れの平均速度⁽¹⁵⁾

本章では、ノズルからの噴き出し流量に対して、フードでの吸い込み流量を漏れ限界流量比より小さい場合 ($K_L=0.58$) と大きい場合 ($K_L=1.24$) に設定したとき、ノズル・フード間のプッシュプル流れの平均速度分布と流れ構造にどのような相違が生じるのか。また、これまでに研究されてきた 2 次元噴流とどのような相違があるのかについて実験的に調査する。

3.1 x_I 方向平均速度

実験装置①を用いて、図 2.4 に示す実験条件(1) ($K_L=1.24$, $Q_3/Q_1 = 2.24$) および実験条件(2) ($K_L=0.58$, $Q_3/Q_1 = 1.58$) における x_I 方向の速度分布に及ぼす吸い込み流量変化の影響を調べた。

図 3.1 は無次元座標 y_I/B_1 に対する x_I 方向平均速度成分 \bar{u} の無次元値 \bar{u}/U_1 の分布が、ノズル噴き出し口からフード開口部までどのように変化するかを示した図である。ノズル噴き出し口では分布がほぼ一定（ポテンシャルコア）である。ポテンシャルコアが消失後下流に向かって x_I 軸上（噴流中心）の最大速度 \bar{u}_m が低下し、分布が上下に拡がって行く。吸い込み流量比 $Q_3/Q_1 = 2.24$ と 1.58 において、噴流軸からかなり離れた所でも流れが生じ、噴流による誘引作用とフードの吸い込みの影響が見られる。 $x_I/L < 0.50$ では速度分布に吸い込み流量比 Q_3/Q_1 による相違が見られないが、 $x_I/L = 0.50$ より下流では相違が見られる。フード開口部付近の \bar{u}/U_1 の値は、 Q_3/Q_1 が大きいほど明らかに大きい。フード開口部から上流へ遠ざかるにつれて、噴流中心軸上では \bar{u}/U_1 の値の Q_3/Q_1 による差が徐々に小さくなるが、噴流軸から少し離れた所では Q_3/Q_1 による相違が見られる。これは、流量比 Q_3/Q_1 が大きいと強い吸い込みの影響で噴流周囲からの誘引空気量が増大するためである。

図 3.2 は図 3.1 の速度分布を各分布の最大速度 \bar{u}_m と半値幅 $b_{1/2}$ で整理し直した図である。なお、図中の低速領域 ($\bar{u}/\bar{u}_m \leq 0.15$) は、熱線の検定結果を外挿して求めた速度であり、参考値として示したものである。図中の実線は静止空気中へ噴出する 2 次元噴流に関する Gutmark ら⁽⁸⁾の結果であるが、噴流中央部の $y_I/b_{1/2} < 1.0$ では Gutmark らの結果と一致している。しかし、 $y_I/b_{1/2} > 1.0$ ではそれよりも大きく、また、 $Q_3/Q_1 = 1.58$ の場合の方は値が大きい。Gutmark らの結果は自己保存性が成

立する場合の結果であるが、プッシュプル噴流の場合はすべて未発達領域または吸い込みの影響を受ける領域にある． $y_1/b_{1/2} > 1.0$ で $Q_3/Q_1 = 1.58$ の場合の方が他に比べて \bar{u}/u_m の値が大きいのは、図 3.5 に見られるように $b_{1/2}$ の値が小さく、噴流外周部における $y_1/b_{1/2}$ に対する \bar{u}/u_m の値が相対的に大きく表れるためである．

$\bar{u}/u_m \leq 0.2$ は熱線の検定結果を外挿して求めた速度であり、参考値として示したものである．

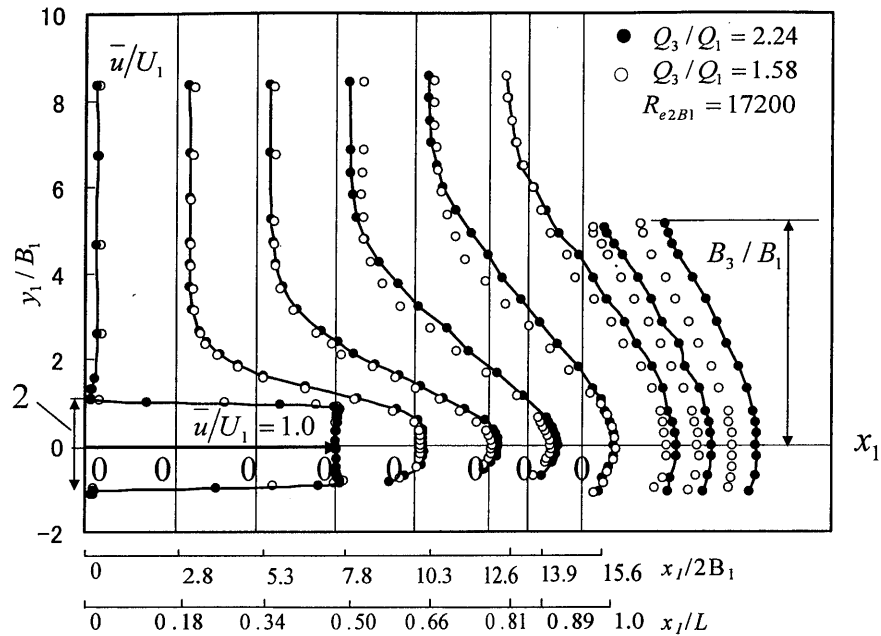


図 3.1 x_1 方向の平均速度分布（実線は $Q_3/Q_1 = 2.24$ の実験結果を結んだ線）

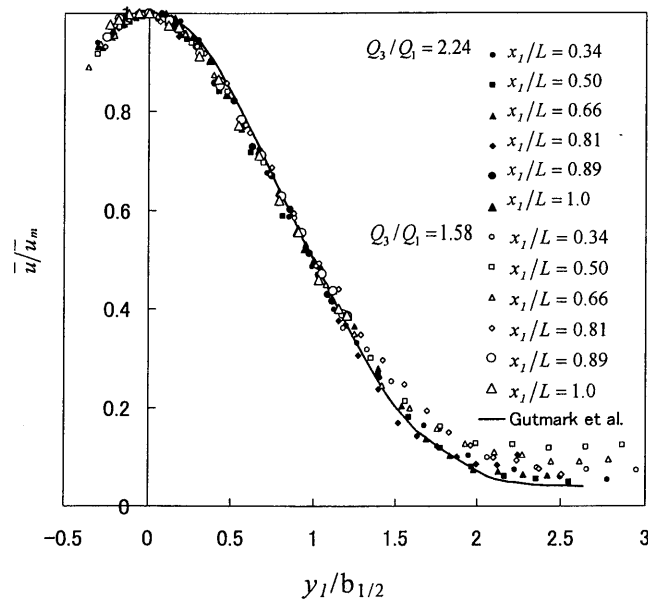


図 3.2 x_1 方向の平均速度分布形

3.2 y_I 方向平均速度

図 3.3 は y_I 方向速度成分 \bar{v} の無次元値 \bar{v}/U_1 の無次元座標 y_I/B_1 に対する分布について、ノズル開口からフード開口までの変化を示した図である。噴流の中心軸上では、 y_I 方向の速度成分が 0 であることから、噴流軸上ではどこでも水平方向に流れていることがわかる。しかし、中心軸から上方に離れると、 $\bar{v} > 0$ となり噴流が外向きに拡がって流れる。そして噴流外周部では、噴流の誘引作用とフードによる吸い込みの影響で、 $\bar{v} < 0$ となっている。噴流中心付近の \bar{v} 分布は、 $x_I/L \leq 0.34$ では Q_3/Q_1 による相違が見られないが、 x_I/L が大きいところでは相違が生じてくる。 $x_I/L = 0.81$ では、流量比が大きい場合 $y_I/B_1 \geq 6$ の噴流外周部で、 \bar{v} が負に大きい。これは、強い吸い込みにより噴流周囲の空気を多く誘引していることを表している。また、 $x_I/L = 0.81, 1.0$ では、流量比が大きい場合速度分布全体が負の方向に移動している。これは、図 3.6 (a), (b) から分かるように、強い吸い込みの影響で速度ベクトルが水平方向に向きを変えていくためである。図 3.4 (a), (b) は、流量比の影響が \bar{u}/u_m に現れる位置 x_I/L のうち、フード近傍の $x_I/L = 0.81, 0.89$ について横軸に $y_I/b_{1/2}$ 、縦軸に \bar{v}/u_m をとって示した図である。図中の実線は Gutmark ら⁽⁸⁾ による静止空気中への噴出流に対する自己保存則成立の場合の結果で、分布形状が x_I/L の値によらず同じである。プッシュプル流れの場合、 $x_I/L = 0.81$ では、 $y_I/b_{1/2} \leq 1.0$ で分布形に流量比の影響が見られないが、 $y_I/b_{1/2} \geq 1.0$ では、流量比が大きい方が負側にずれる。これは、周囲の空気を多く取り込んでいることを表している。また、 $x_I/L = 0.89$ では、分布全体で流量比が大きい方の値が小さい。これは、前述のように強い吸い込みの影響で、フードに向かう流れが水平方向に向きを変えていくためである。また、2 次元噴流よりプッシュプル流れの方の値が大きいが、現在のところ原因は不明である。

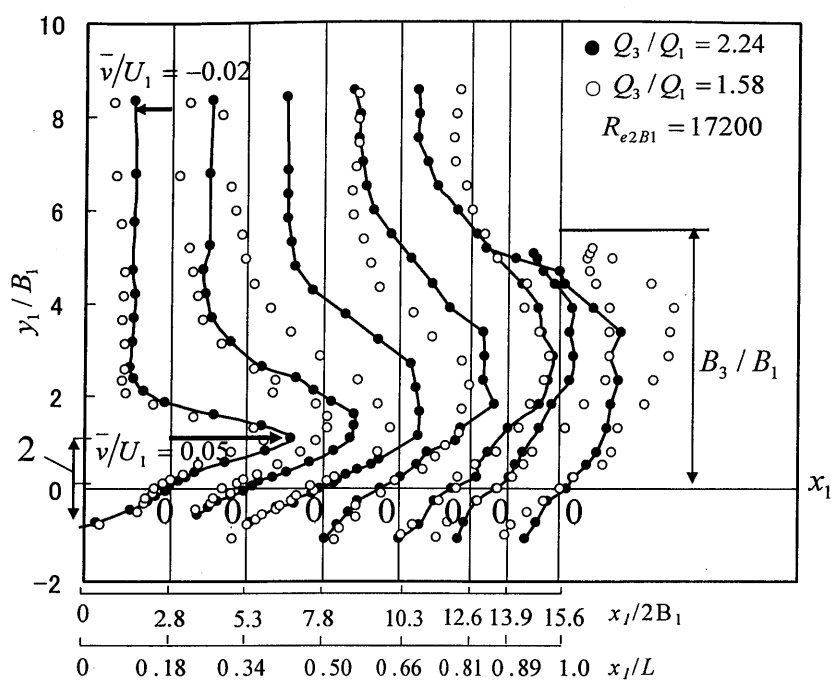


図 3.3 y_1 方向の平均速度分布 (実線は $Q_3/Q_1 = 2.24$ の実験結果を結んだ線)

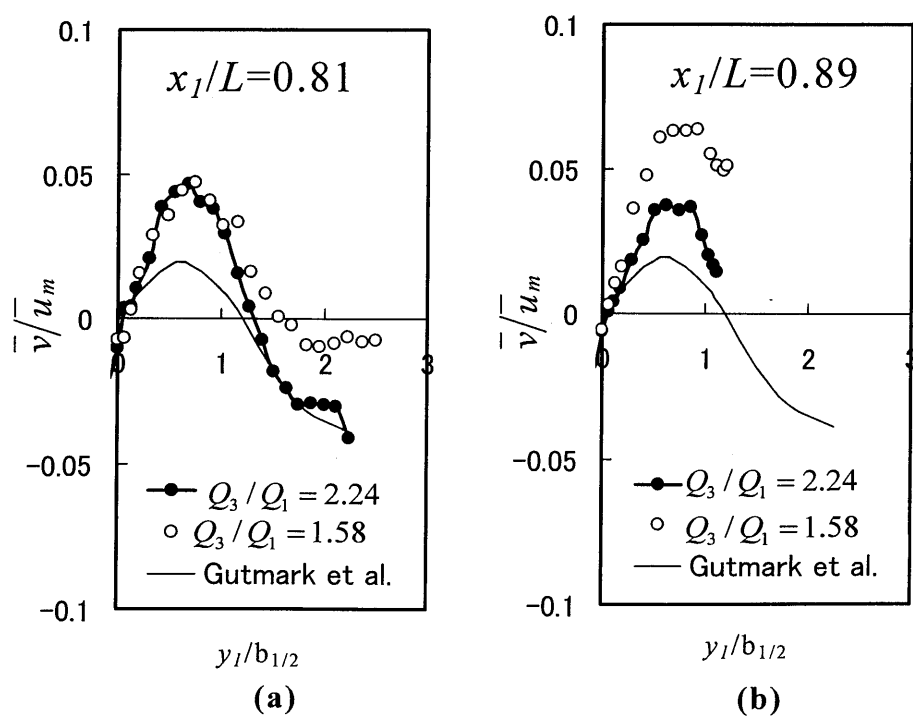


図 3.4 y_1 方向の速度分布形 (太い実線は $Q_3/Q_1 = 2.24$ の実験結果を結んだ線)

3.3 噴流の中心軸上速度と半値幅

図 3.5 (a), (b)にプッシュプル噴流の中心軸上の無次元速度 $(U_1 / \bar{u}_m)^2$ および無次元半値幅 $b_{1/2} / B_1$ の下流方向への変化を示す. 噴き出し直後では $(U_1 / \bar{u}_m)^2 = 1$ であるが, 下流に向かって \bar{u}_m が減少するので $(U_1 / \bar{u}_m)^2$ の値は増大する. $x_1 / L = 0.50$ より下流では, \bar{u}_m の値が静止空気中へ噴出する 2 次元噴流の場合よりも大きくなり, $(U_1 / \bar{u}_m)^2$ の値が 2 次元噴流に関する Goldschmidt⁽¹⁴⁾ らによる実験結果より小さくなる. $Q_3 / Q_1 = 2.24$ の場合は, $Q_3 / Q_1 = 1.58$ の場合より $(U_1 / \bar{u}_m)^2$ の値が小さくなるのは, 吸い込み流が増すことによりプッシュプル噴流の中心軸上速度がより大きくなるからである. しかし, $Q_3 / Q_1 = 1.58$ の場合には, 吸い込み口のごく近傍で, 中心軸上の速度が静止空気中へ噴出する 2 次元噴流の場合よりも小さくなるので Goldschmidt らの結果より大きくなる.

一方, $b_{1/2} / B_1$ の値は Gutmark ら⁽⁸⁾ により得られた静止空気中への 2 次元噴流の実験式より大きい. これは, 吸い込みの影響でプッシュプル流れの速度分布全体が 2 次元噴流より大きくなるためである. また, 流量比が大きい $Q_3 / Q_1 = 2.24$ の方が $Q_3 / Q_1 = 1.58$ の場合より値が大きい. これは, 図 3.1 で示したように, 流量比が大きいと, 強い吸い込みにより下流に向かって速度分布全体に渡り速度が大きな値となるためである.

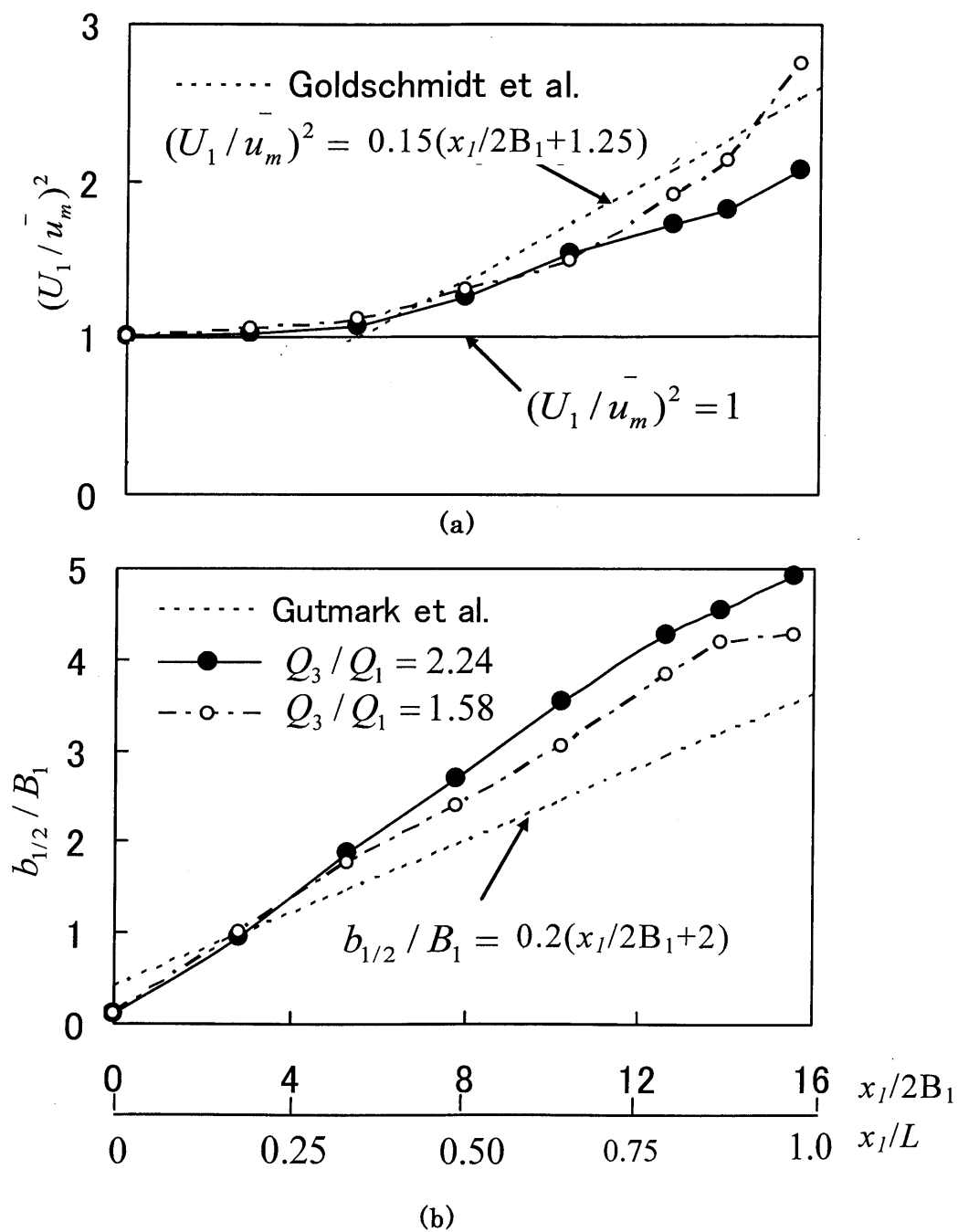


図 3.5 最大平均速度と半値幅の下流への変化

3.4 噴流に与える吸い込みの影響

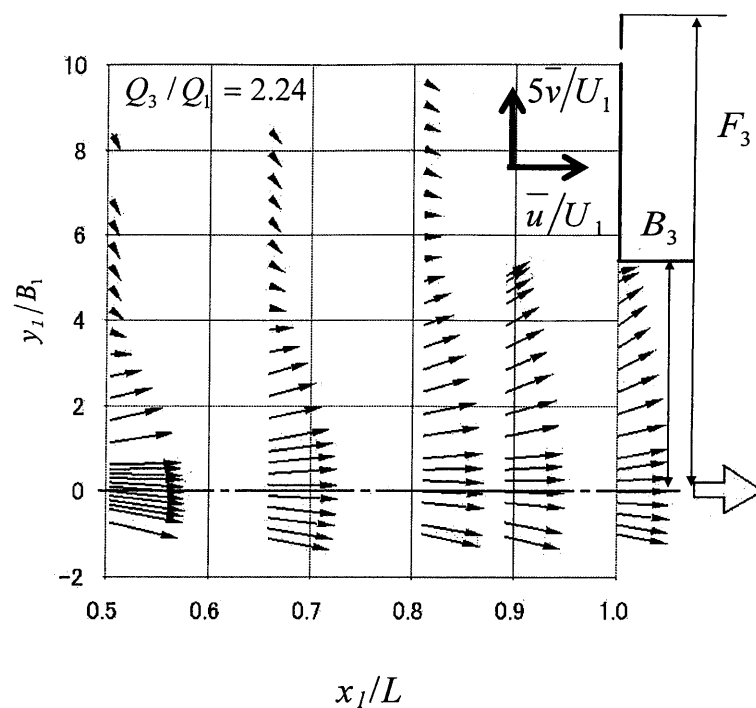
流量比が図 2.4 に示した漏れ限界流量比よりも小さい場合（実験条件(2)）と、大きい場合（実験条件(1)）の流れについてフード近傍の流れの相違を考察する．図 3.6 (a), (b)は、 $Q_3/Q_1=2.24, 1.58$ のそれぞれの場合において、横軸に x_1/L 、縦軸に y_1/B_1 をとり、吸い込みの影響が見られる $x_1/L=0.50\sim 1.00$ の流れ領域における速度ベクトルを記入した図である．プッシュプル噴流の中心軸近傍の流れには流量比による相違は見られないが、噴流軸から上方へ離れるにつれて相違が生じ、外縁部では、次のような流量比による相違が見られる． $Q_3/Q_1=1.58$ の場合には、フード近傍（ $x_1/L=0.89$ ）ではプッシュプル噴流の流れがフランジの存在のため外側に向かって流れ、プッシュプル噴流の外縁部（ $y_1/B_1=5.0$ ）では気流がフードに吸い込まれず外部へ漏れている． $Q_3/Q_1=2.24$ の場合には吸い込みが強いため、フードに近づくにつれ噴流外縁部の流れが内向きに曲げられ、プッシュプル噴流が完全にフードに吸い込まれる．このため u と v の平均速度分布に前述のような吸い込み流量比による相違が現れるのである．

静止空気をフードで吸い込む場合の流れはポテンシャル流れとして扱うことができる．これに関する研究が種々あるが、ここではプッシュプル噴流が吸い込まれる時の流速と比較するため、山口ら⁽⁵⁾の研究結果と比較して考察する．図 3.7 は噴流中心軸上の最大速度 \bar{u}_m の無次元値 \bar{u}_m/\bar{U}_3 がフード開口面に近づくにつれてどのように変化するかを示している．ここで \bar{U}_3 はフード開口の平均断面吸い込み速度である．山口ら⁽⁵⁾はこれに関して、図 3.8 (a), (b)に示すようなフランジタイプとフレアータイプの 2 種類のフード形状について調べている．彼らの結果は x_3 軸の座標原点を図 3.8 のように取っているので、フランジタイプの方がフレアータイプよりもフード開口面近傍では \bar{u}_m の値が大きくなっている．また、フランジタイプの場合は式 (3.1) に示す Silverman の経験式⁽¹³⁾（ $K=3.7$ ）とよく一致している．

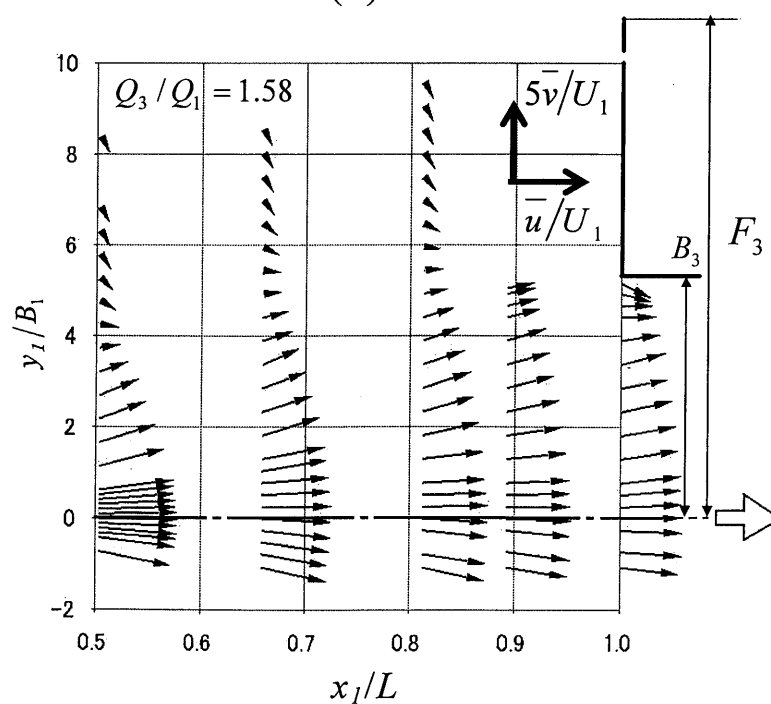
$$\frac{\bar{u}_m}{\bar{U}_3} = \frac{2B_3}{K \cdot x_3} \quad (3.1)$$

いずれの場合も吸い込み速度は、フード開口面から上流に向かって急速に低下している．これに対し、実験で採用したフードが図 3.8 (c) で示すような形状であるため、吸い込み口における流速がフランジタイプとフレアータイプの間位置する．予測されるように、吸い込み口から少し離れた場所では、プッシュプル流れの流速がフードのみによる吸い込み流れの場合よりも非常に大きくなっている．このように、プッシュプル流れは有害ガスを捕そくすれば、プッシュプル噴流が持っている運動量のため有害ガスを輸送する力は維

持され、フードのみで吸い込む場合と比較して有害ガスを完全にフードへ吸引することができる。



(a)



(b)

図 3.6 フード近傍の速度ベクトル図

(速度ベクトルは y_1 方向成分を $5\bar{v}/U_1$, x_1 方向成分を \bar{u}/U_1 として記している)

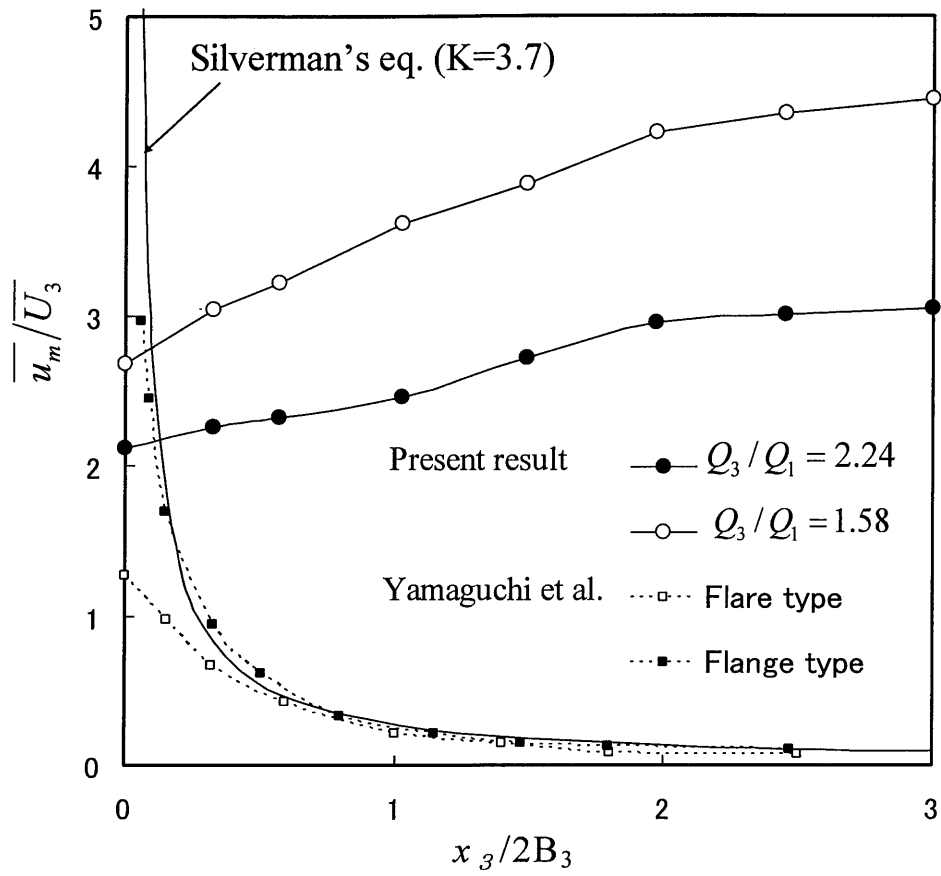


図 3.7 フード近傍の最大平均速度

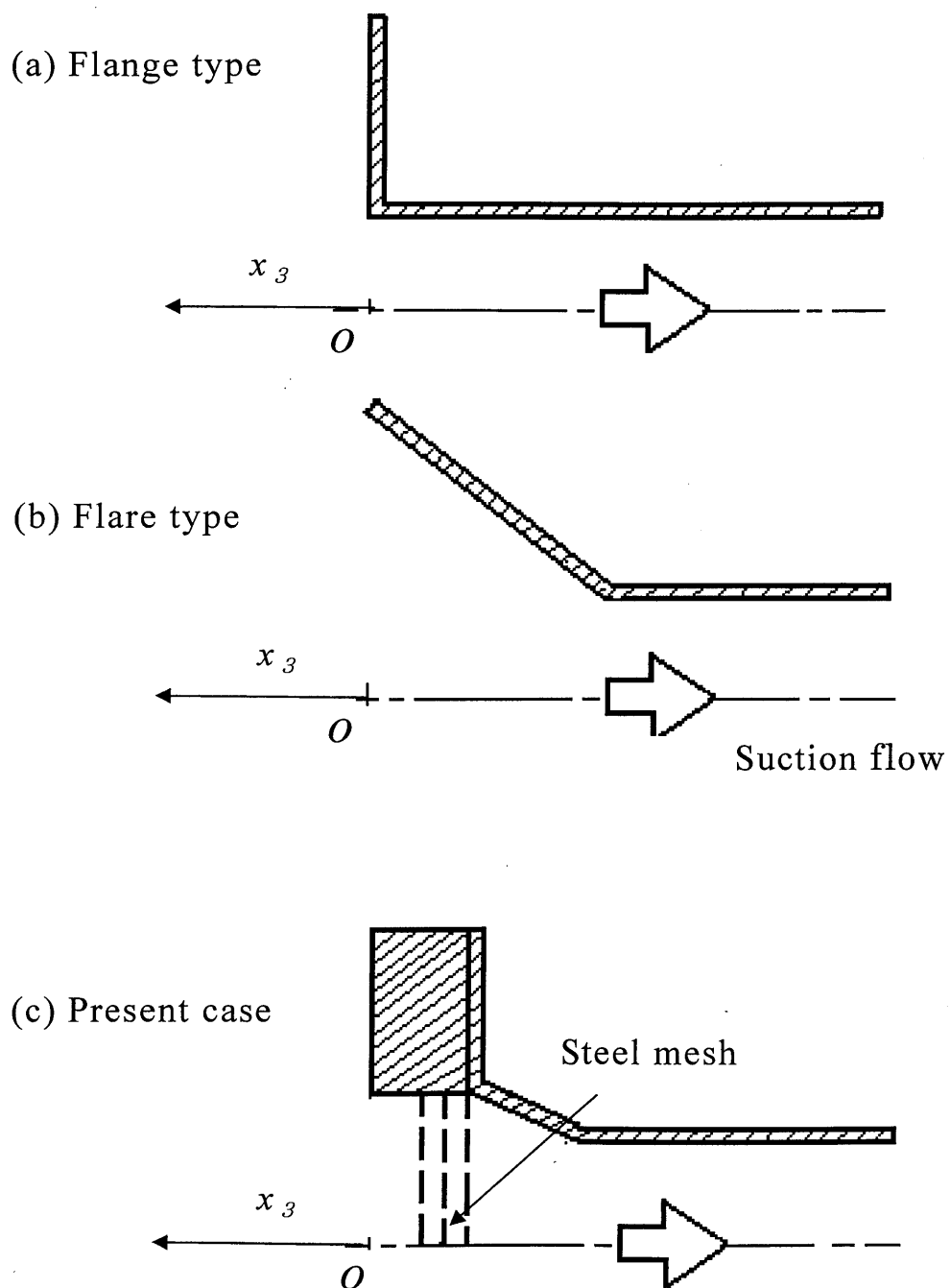


図 3.8 フード縦断面の概略図

3.5 第3章のまとめ

本章では、プッシュプル流れの平均速度分布と流れ構造について明らかにするために、漏れ限界流量比との関係において吸い込み流量比を変化させたとき、どのような相違が生じるのか、またプッシュプル噴流はこれまでに研究されてきた2次元噴流とどのような相違があるのかについて実験的に考察した。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 漏れ限界流量比 $K_{L0}=0.88$ より大きい吸い込み流量比の場合は、プッシュプル流れの噴流部が完全にフード開口に吸引され、これよりも小さい値の場合は噴流の外縁部がフードのフランジに衝突し、噴流の一部が外部へ漏れる。このためノズル出口からフード吸い込み口までの速度分布の変化に両者の相違が現れる。
- (2) 噴流軸方向の速度成分 \bar{u} の分布には、 $x_l/L \geq 0.5$ ではフードによる吸い込みの影響が現れ、吸い込みが強い場合、下流に向かってまず噴流外縁部の速度が大きくなる。更に下流のフード開口近傍で中心軸上速度が大きくなる。無次元速度 \bar{u}/\bar{u}_m の分布は、 $y_l/b_{1/2} < 1.0$ では Gutmark らの2次元噴流の結果に一致するが、 $y_l/b_{1/2} > 1.0$ では2次元噴流の結果より大きくなる。また、流量比が小さい方が \bar{u}/\bar{u}_m の値が大きい。
- (3) 噴流中心軸に垂直な y_l 方向の速度成分 \bar{v} は、フードによる吸い込みの影響により速度ベクトルの向きがフード近傍で大きく変化するため、静止空気中へ噴出する2次元噴流の分布のような相似形とはならない。
- (4) 噴流中心軸上の x_l 方向速度成分 \bar{u}_m とこの分布の半値幅 $b_{1/2}$ は、プッシュプル流れでは静止空気中へ噴出する2次元噴流の場合より大きい。これは、吸い込みの影響により噴流周囲からの気流の誘引が増大していることを表している。
- (5) 有害ガスをフードに吸引させる効果に関して、プッシュプル流れのフード開口への流入の様子とフードのみによる吸引の様子とを比較し、プッシュプル流れの方が、少量の噴き出し空気でも上流で発生した有害ガスを広範囲で捕捉できることを明らかにした。

第 4 章

プッシュプル流れの乱れ特性⁽¹⁶⁾⁽¹⁸⁾

この章ではプッシュプル流れの乱れ特性が，流量比の影響でどのように相違するのか，また，プッシュプル流れは完全発達した 2 次元噴流の乱れ特性とどのような相違があるのかについて実験的に調査する．

4.1 乱れの間欠性

前章に引き続き実験装置①を用いプッシュプル流れの乱れ特性について実験を行った．

ノズルからフードに向かうプッシュプル流れの中心部は完全な乱流状態であるが，外周部は周囲の静止空気を取り込みながら下流に流れていくため，乱流と非乱流の間欠的な流れとなる．プッシュプル流れでは，吸い込みの影響により完全発達した 2 次元噴流外周部の乱れの間欠性と相違することが考えられる．乱れの間欠性を定量的に表すために，ここでは，観測時間に占める乱流時間の割合である間欠係数 γ を求める．乱流か非乱流の判別には，Gutmark ら⁽⁸⁾と同様， x_I 方向瞬時変動速度 u' の時系列信号から得られる $(\partial u' / \partial t)^2$ および u'^2 を用いた．

すなわち，

$$(i) \quad \left\{ \frac{\partial(u'/U_1)}{\partial[t/(B_1/U_1)]} \right\}^2 \geq 9.0 \times 10^{-6}$$

$$(ii) \quad u'^2 \geq 0.3 \overline{u'^2}$$

のいずれかの条件を満たす場合を乱流とし，それ以外を非乱流とした．なお，ここで用いたそれぞれの条件の閾値は瞬時速度の時系列データを観察し，閾値を試行錯誤して間欠係数を求め，噴流中心部で $\gamma=1$ に近く，外周部で減少するように定めた．判別結果は 2 値化し，乱流を 1，非乱流を 0 とする．図 4.1 (a) ～ (d) に，乱流か非乱流の判別過程の例 ($Re_{2B1}=17200$ ， $Q_3/Q_1=2.24$ ， $x_I/L=0.83$ ， $y_I/B_1=6.5$ の判別) を示す．図 4(a) は， x_I 方向瞬時速度 u の時系列信号，図 4(b) は， $(\partial u' / \partial t)^2$ による判別結果，図 4(c) は u'^2 による判別結果，図 4 (d) は最終的な判別結果であり，この例では間欠係数は 0.51 である．

図 4.2 (a) ～ (d) は、無次元平均速度分布 \bar{u}/U_1 が流量比の影響を受ける領域において、横軸に $y_1/b_{1/2}$ 、縦軸に間欠係数 γ をとって示した図である。レイノルズ数が同じ場合、 $x_1/L = 0.66$ と $x_1/L = 0.83$ の $1 < y_1/b_{1/2}$ の領域では、流量比が大きい方が γ の値が小さく、分布が噴流軸側に寄る。これは、流量比が大きいと、強い吸い込みの影響により、噴流周囲から非乱流の空気をより多く誘引するためである。また、図 4.2 (a) において、 $Q_3/Q_1=1.58$ の場合の $x_1/L = 0.66$ における流れの外周部で、間欠係数の値が 0.35 から 0.40 の値を示しているが、これは、フードに漏れがあるため、フードのフランジに衝突した気流が上流方向へと流れの向きを変え、噴流外縁部の乱れを増大させていると考えられる。

図 4.3 は、図 4.2 の結果の中の $Re_{2B1}=17200$ 、 $x_1/L=0.66$ 、 $x_1/L=0.83$ に関する結果を、横軸に x_1/L 、縦軸に間欠係数が $\gamma = 0.4, 0.6$ をとるときの中心軸からの無次元距離 $y_1/b_{1/2}$ をとって整理し直した図である。この図から、この無次元幅 $y_1/b_{1/2}$ が下流に向かってわずかに狭くなっている。また、 $\gamma=0.4$ の場合、流量比が $Q_3/Q_1=2.24$ では、完全発達した 2 次元噴流の値より小さくなっている。これは、下流に向かって吸い込みの影響が強くなり半値幅が増大するためである。また、流量比が大きい方が下流に向かって非乱流の気流がフードに多く流れ込み、間欠係数 γ の値が小さくなるためである。

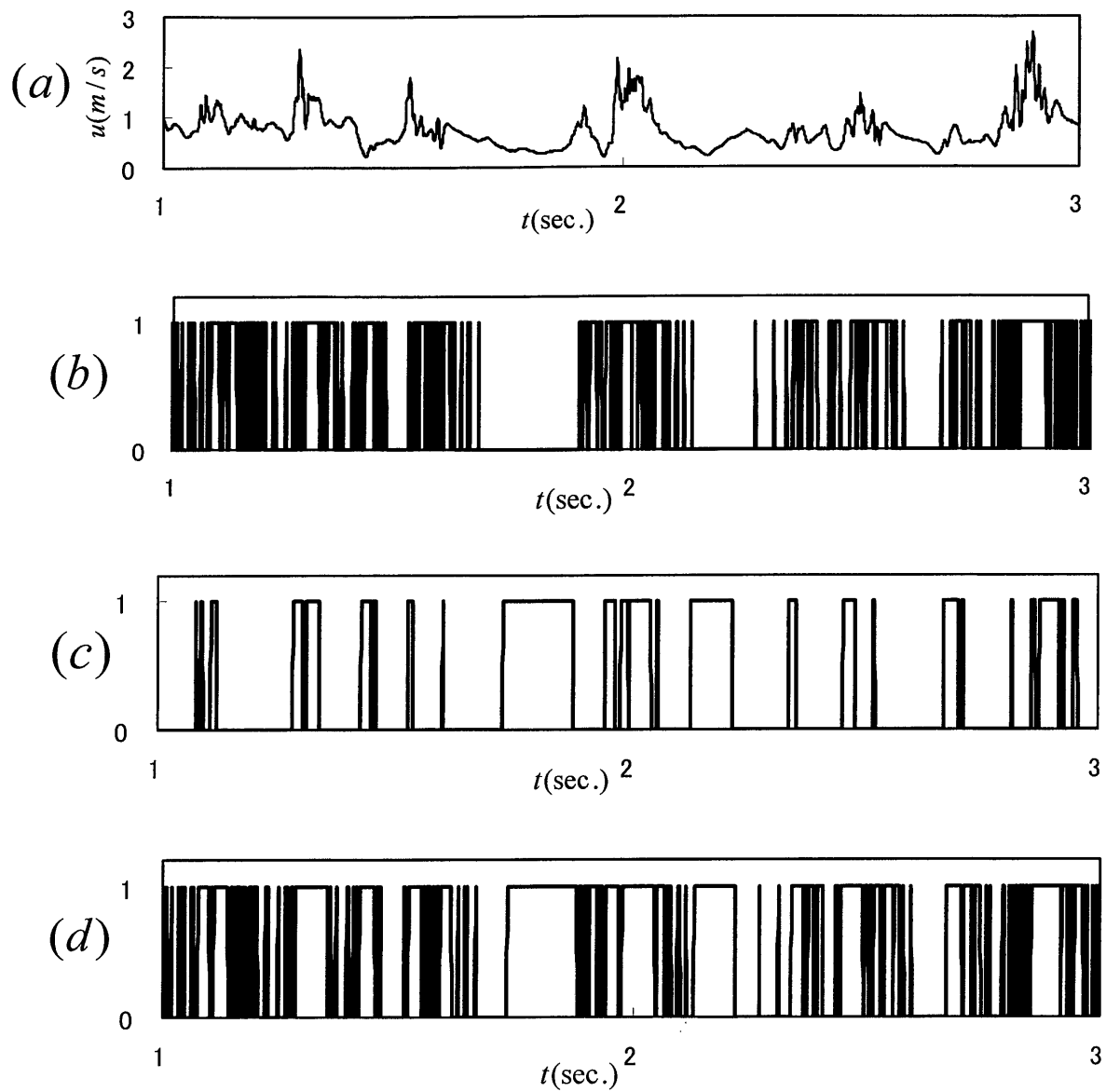


図 4.1 乱流か非乱流かの判別例

($Re_{2B1}=17200$, $Q_3/Q_1=2.24$, $x_l/L=0.83$, $y_l/B_1=6.5$ での判別)

(a): u' の時系列信号

(b): $(\partial u'/\partial t)^2$ による判別結果の 2 値 (0 or 1) の時系列信号

(c): u'^2 による判別結果の 2 値 (0 or 1) の時系列信号

(d): 最終的な判別結果の 2 値 (0 or 1) の時系列信号

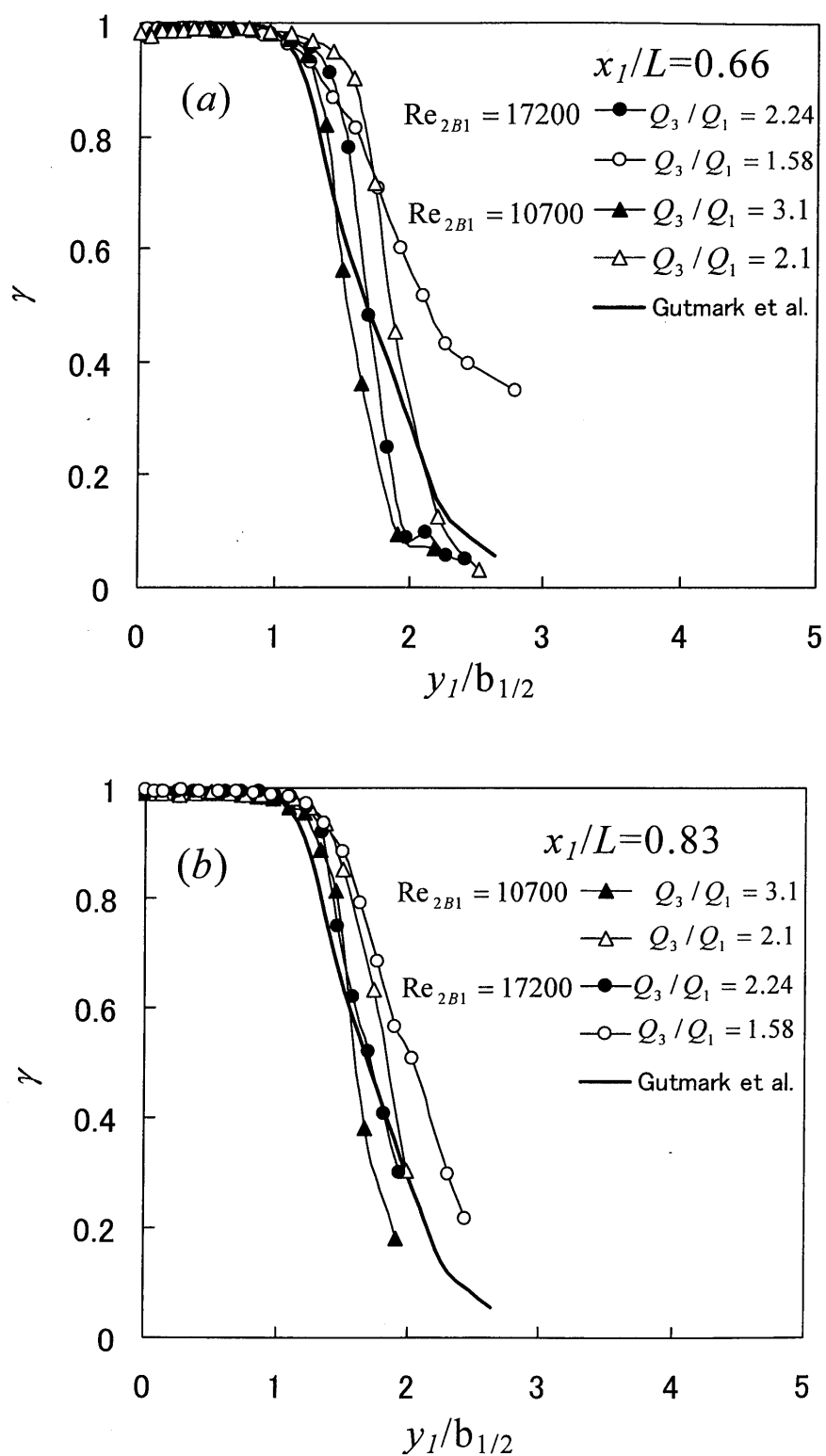


図 4.2 フード近傍の間欠係数分布

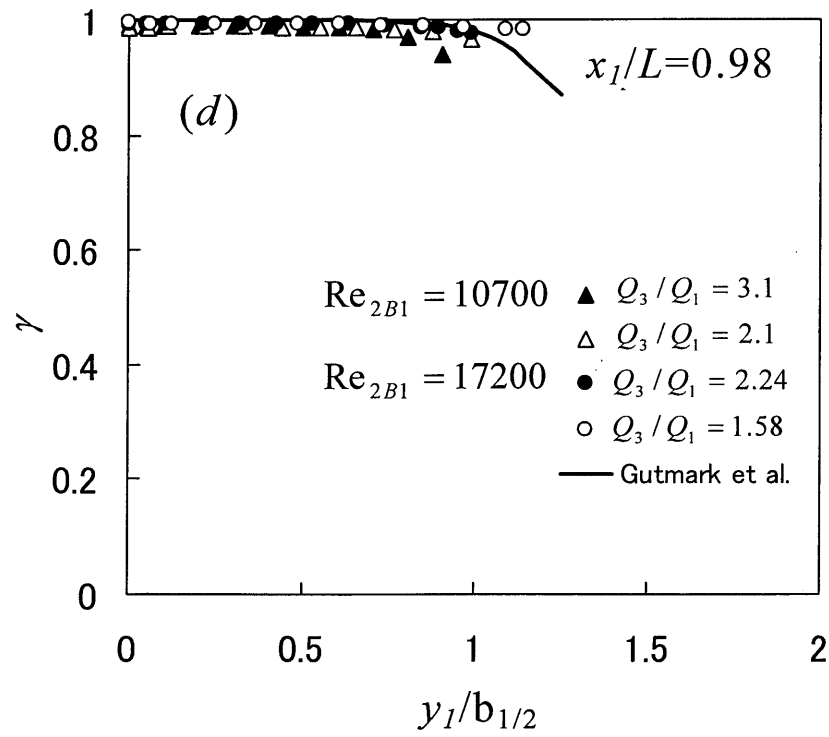
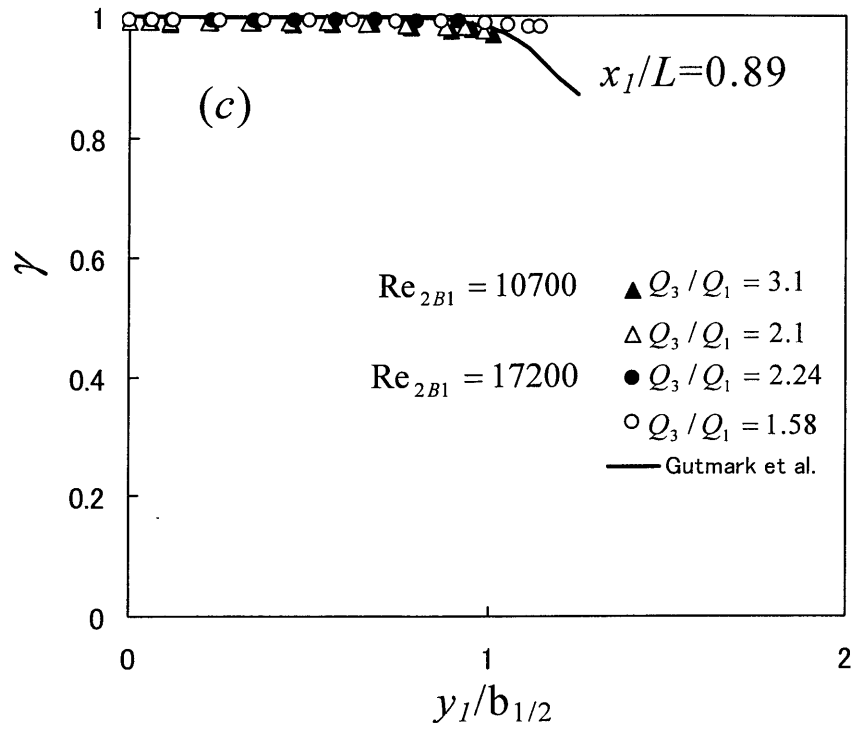


図 4.2 フード近傍の間欠係数分布

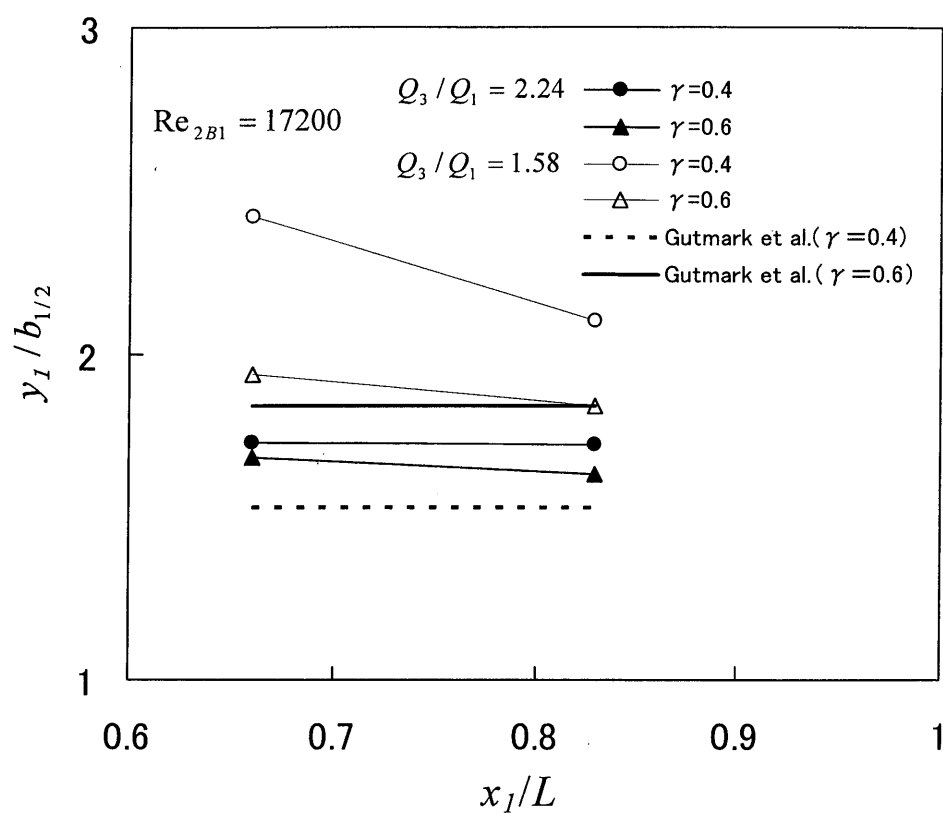


図 4.3 噴流中心から間欠係数が $\gamma = 0.4, 0.6$ を取るまでの無次元距離 $y_I / b_{1/2}$

4.2 x_I 方向乱れ強度

図 4.4 (a), (b)は y_I / B_1 に対する, x_I 方向乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_I$ の分布が, ノズル開口からフード開口まで変化する様子を示した図である. また, 図中に示した $y_I = B_3$ は, フード開口の上端位置を示している. フードに漏れがある流量比 $Q_3/Q_1 = 1.58$ の場合, x_I/L の値が 0.50 から 0.81 の範囲で流れの外周部で乱れが小さくなっている. 一方, 漏れがない場合, 乱れ強度の分布形に流量比の影響がほとんど見られない.

図 4.5 は無次元座標 y_I/B_1 に対する, x_I 方向相対乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/\bar{u}$ の分布が, $x_I/L = 0.66$ からフード開口までどのように変化するかを示した図である. 分布形に流量比の影響が見られ, フードに近づくほど, また, 流量比が大きいほど相対乱れ強度が小さくなっていく様子が見られる. これは, 図 4.4 (b) で示したように, 乱れ強度が流量比の影響を受けず分布形が同じであるが, 流量比が増大すると同じ x_I/L の位置での x_I 方向の平均速度 \bar{u} が増大するので, 相対乱れ強度が小さくなるのである.

図 4.6 (a), (b)は, x_I 方向無次元平均速度分布 \bar{u}/U_1 が流量比の影響を受ける領域について, 無次元座標 $y_I/b_{1/2}$ に対する x_I 方向無次元乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/\bar{u}_m$ の分布を示した図である. 流れが未発達であるため, 図中に示した Gutmark ら⁽⁸⁾ の完全発達した 2 次元噴流での結果より値が小さい. また, $Re_{2B1}=10700$, $Q_3/Q_1=3.1$ の下流で $\sqrt{u'^2}/\bar{u}_m$ の値が小さくなっていく. これは, 流量比が大きいと強い吸い込みにより下流で \bar{u}_m/U_1 の値が大きくなっていく. また, 図 4.4 (a), (b)で示したように, $\sqrt{u'^2}/u_I$ の値が, 流量比の影響をほとんど受けないことから, 吸い込みによる \bar{u}_m/U_1 の増大により, フードに近づくとき, $\sqrt{u'^2}/\bar{u}_m$ の値が減少する.

4.3 y_I 方向乱れ強度

図 4.7 (a), (b)は, 無次元座標 y_I/B_1 に対する, y_I 方向乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/U_1$ の分布が, ノズル開口からフード開口まで変化する様子を示した図である. 吸い込み口である $x_I/L = 1.00$ では, 流量比が大きいほど外周部に向かって乱れ強度が増大している. 図 4.8 は, y_I 方向相対乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/\bar{u}$ の y_I/B_1 に対する分布を $x_I/L = 0.66 \sim 1.00$ で示した図である. 図 4.5 で示した x_I 方向の相対乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/\bar{u}$ のような流量比による相違が見られない. 図 4.9 (a), (b)は, x_I 方向無次元速度 \bar{u}/U_1 が流量比の影響を受ける領域について, 無次元座標 $y_I/b_{1/2}$ に対する y_I 方向無次元乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/\bar{u}_m$ の分布を示した図である. 図中の実線は Gutmark ら⁽⁸⁾ の完全発達した 2 次元噴流での結果である. 図 4.6 (a), (b)で示した $\sqrt{u'^2}/\bar{u}_m$ と比較して, 流量比による差が小さい. この結果については 4.6 節の乱れの生成で考察する.

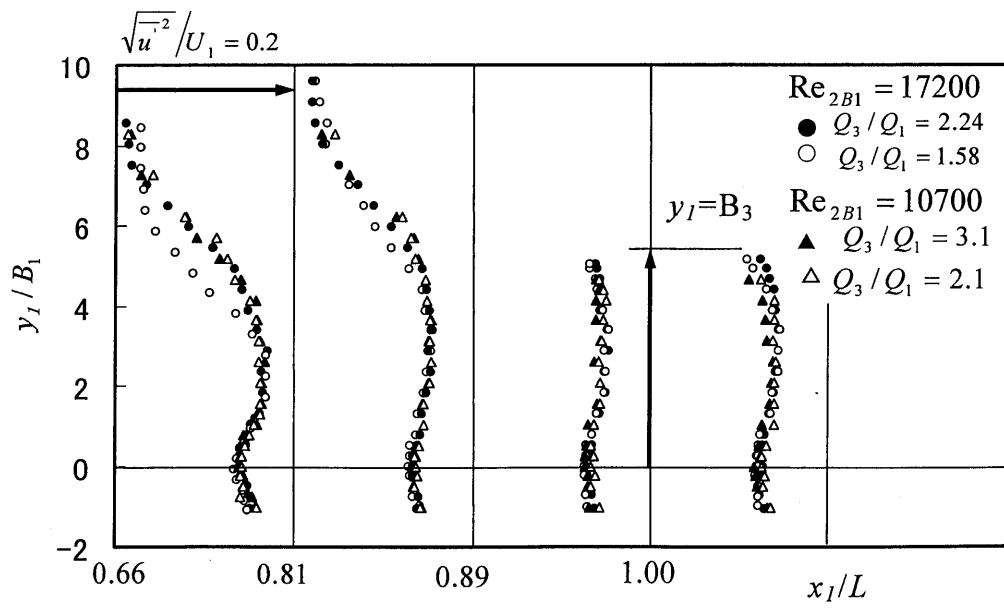
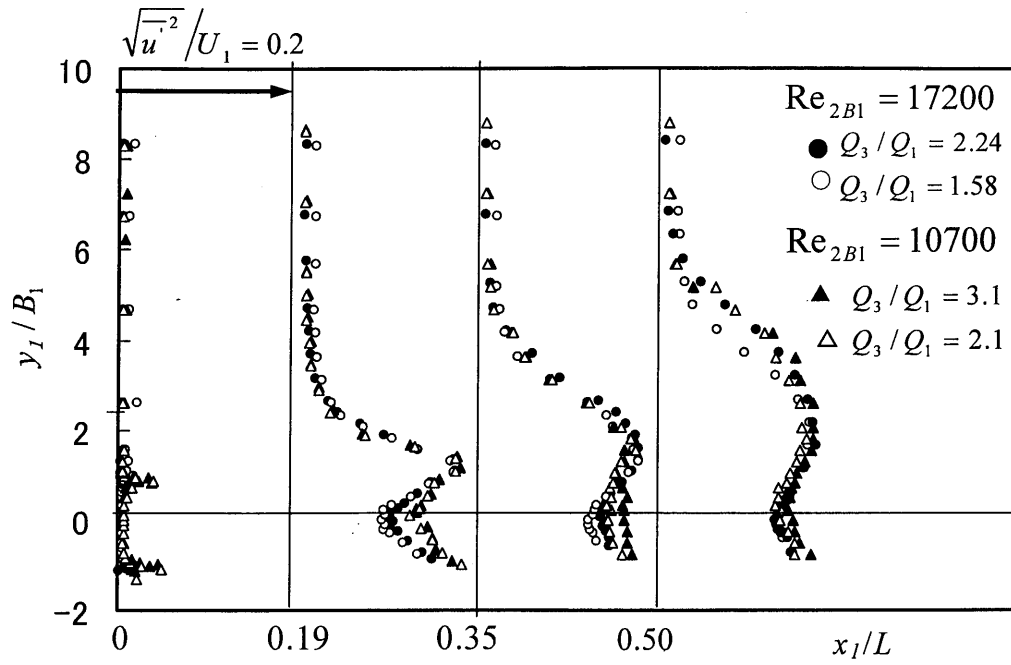


図 4.4 x_1 方向の乱れ強度分布

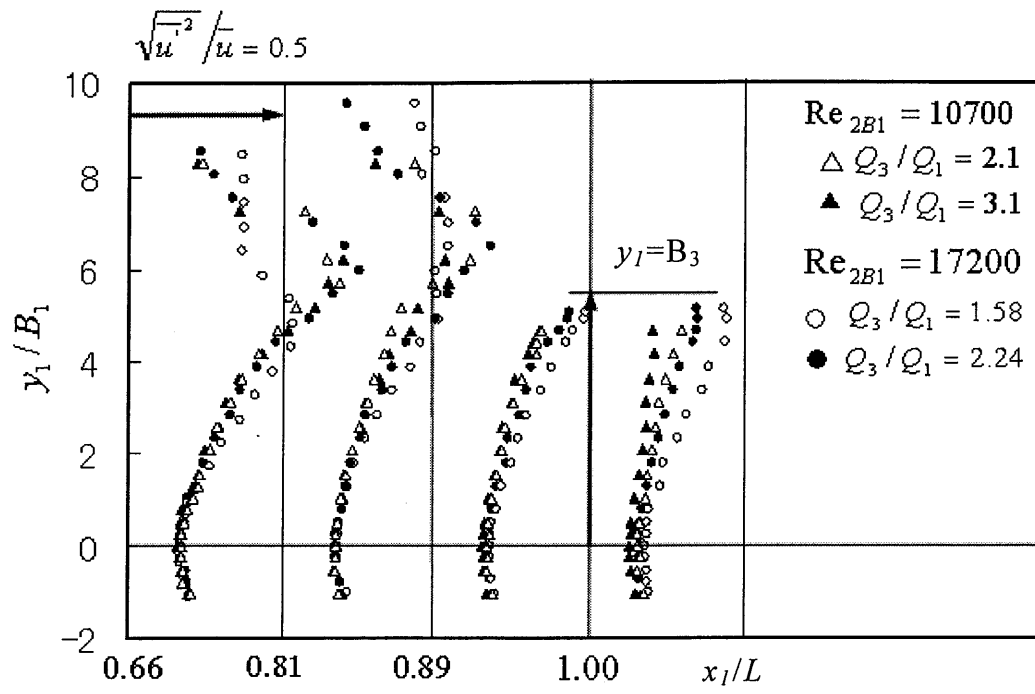


図 4.5 x_1 方向の相対乱れ強度分布

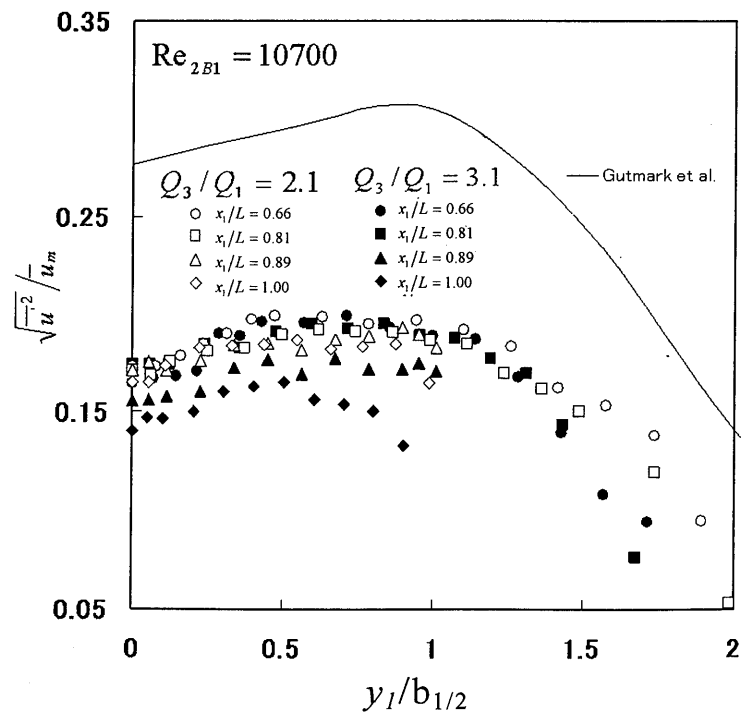
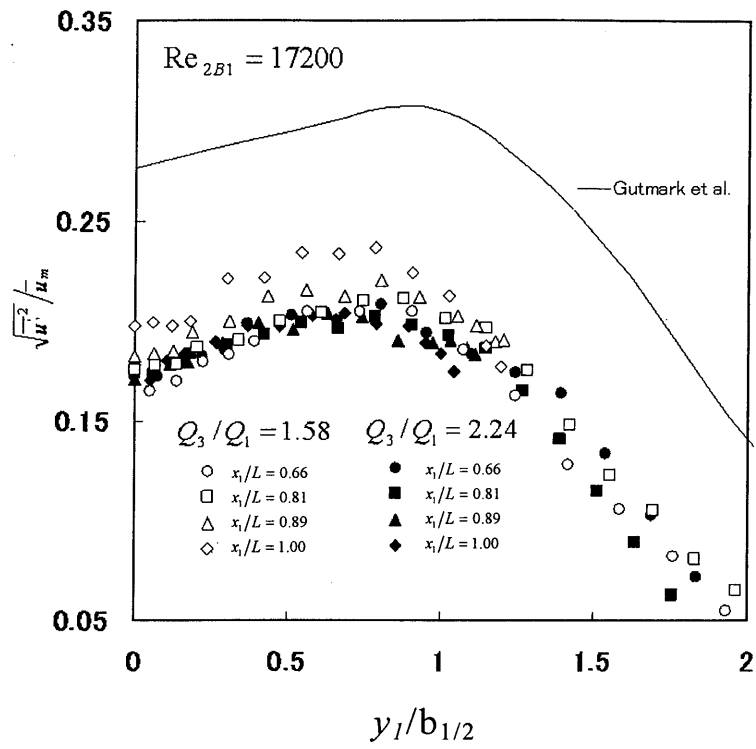
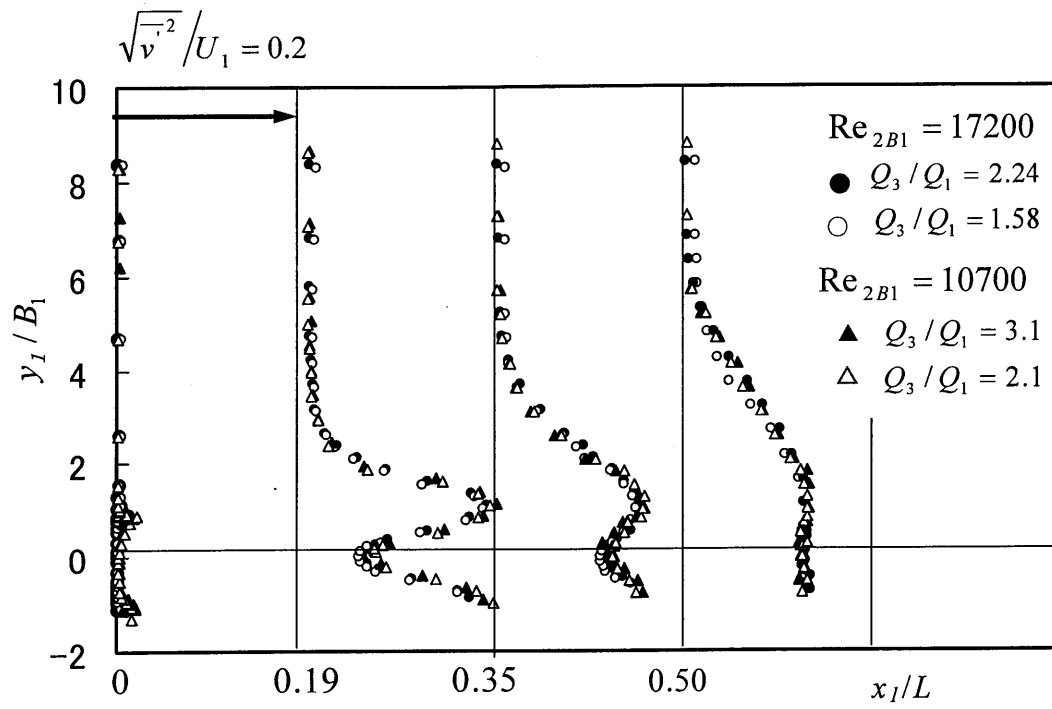
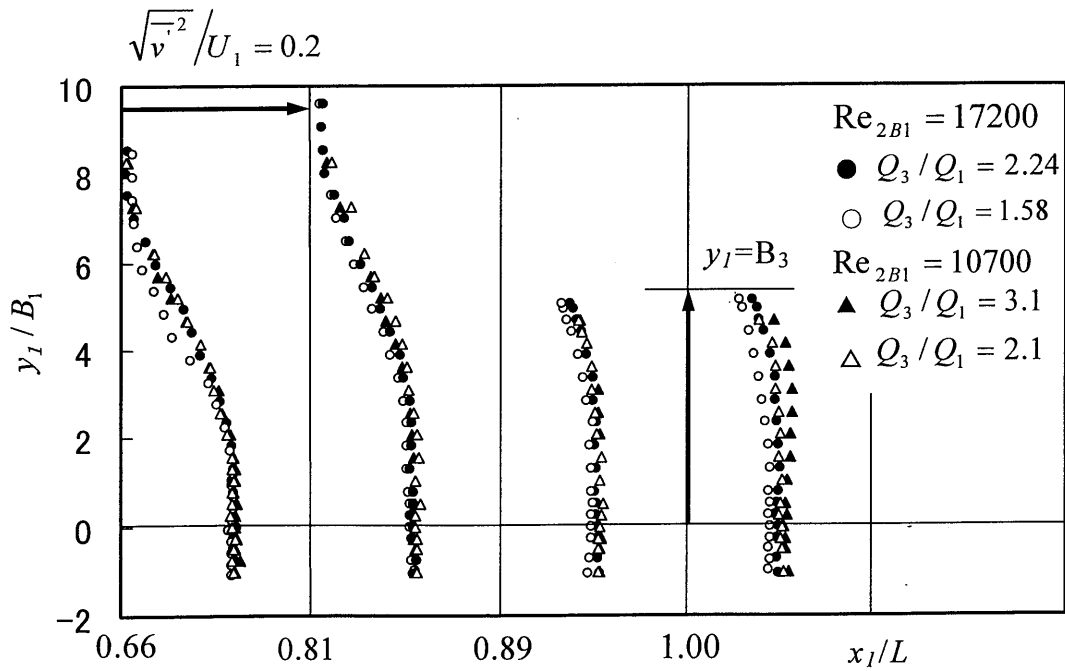
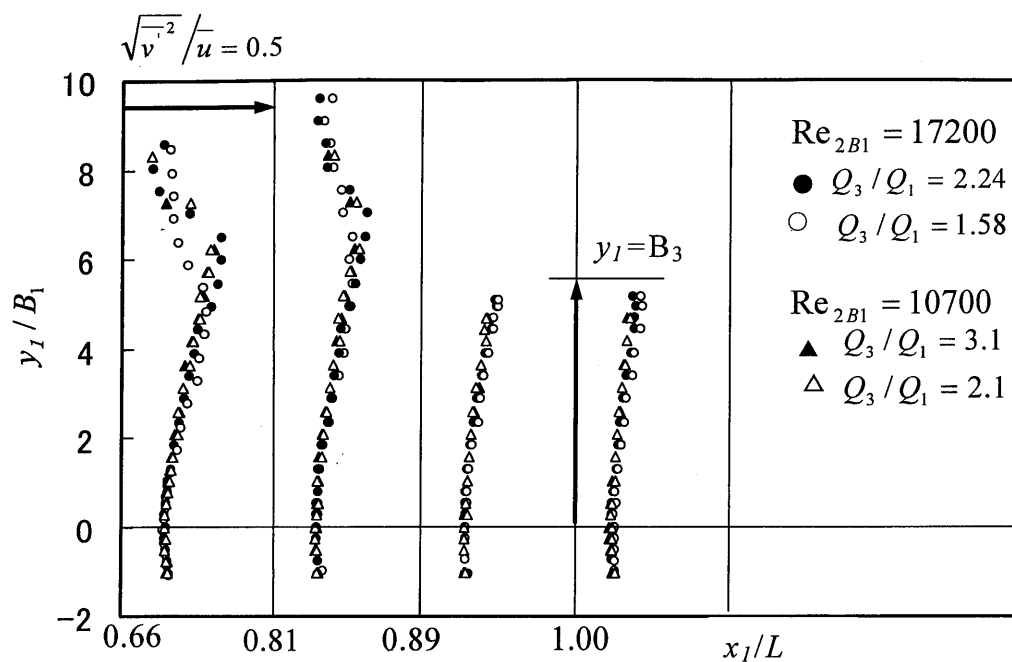


図 4.6 x_1 方向の乱れ強度分布

(a) $x_1/L = 0 \sim 0.50$ (b) $x_1/L = 0.66 \sim 1.00$ 図 4.7 y_1 方向の乱れ強度分布



($x_l / L = 0.66 \sim 1.00$)

図 4.8 y_l 方向の相対乱れ強度分布

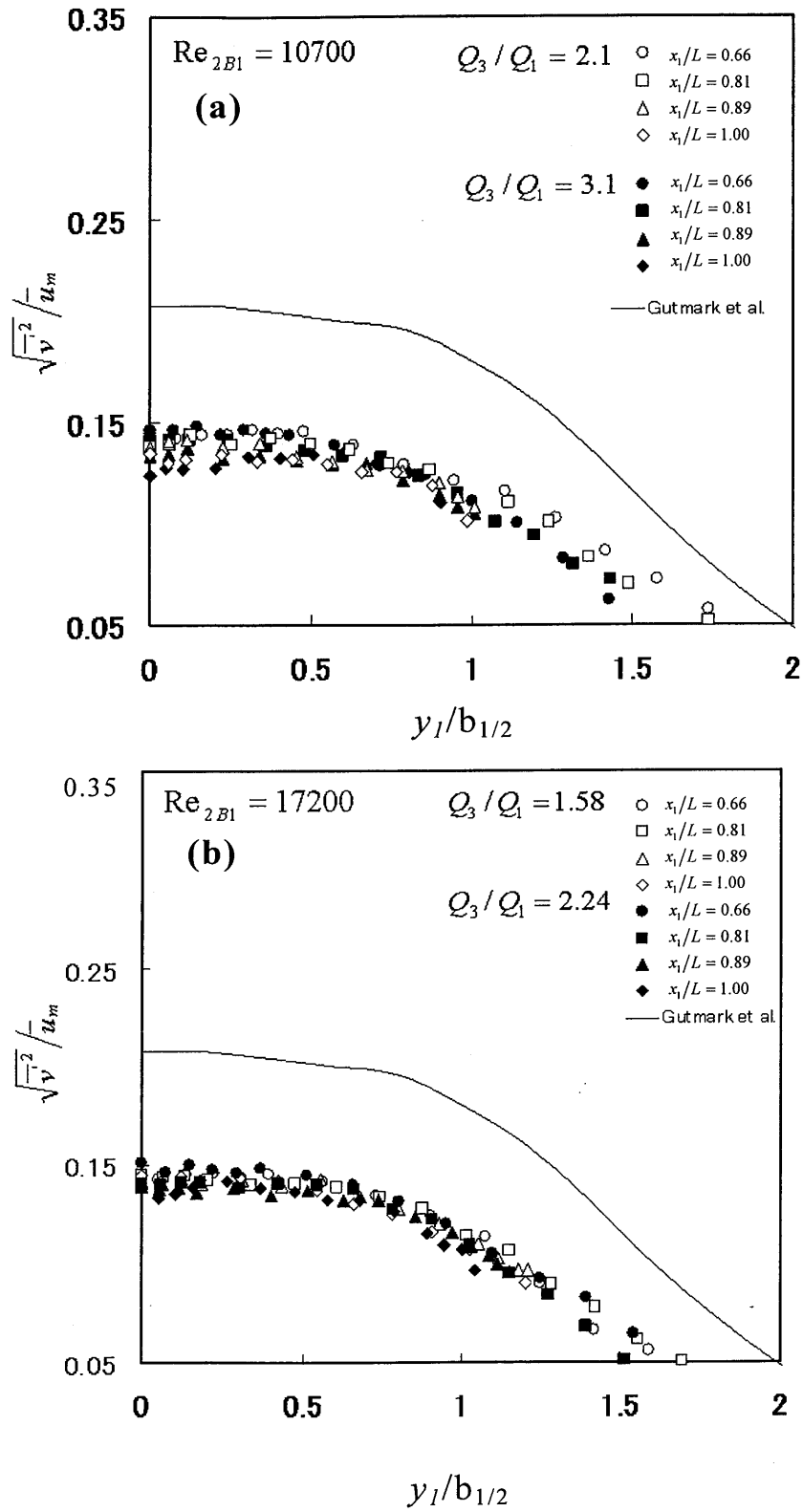


図 4.9 y_l 方向の乱れ強度分布

4.4 噴流中心軸上の乱れ強度

図 4.10 は流れの中心軸上における, x_l 方向および y_l 方向の無次元乱れ強度の下流方向への変化を示した図である. また, 同図中には比較のため, Gutmark ら⁽⁸⁾, Bradbury⁽⁹⁾, Heskestad⁽¹⁰⁾ による 2 次元噴流の場合の結果も示した. 2 次元噴流の未発達領域では x_l 方向無次元乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_m$ および y_l 方向無次元乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/u_m$ が下流に向かって増大していき, 完全発達領域でそれぞれ一定値 (0.26, 0.2) となる⁽⁸⁾. しかし, 未発達領域での下流への発達過程が研究者により異なり, 実験装置によりかなり相違することがわかる. 一方, プッシュプル流れでは無次元乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_m$ は, 下流に向かって流量比 Q_3/Q_1 が大きいほど図中に実線で示した Gutmark ら⁽⁸⁾ の 2 次元噴流に関する結果より値が小さくなる. これは, フードに近づくほど吸い込みの影響で流れが加速され, 乱れの生成が減少するためである. $\sqrt{v'^2}/u_m$ は流量比 Q_3/Q_1 の値による相違が小さく下流に向かって値が小さくなる.

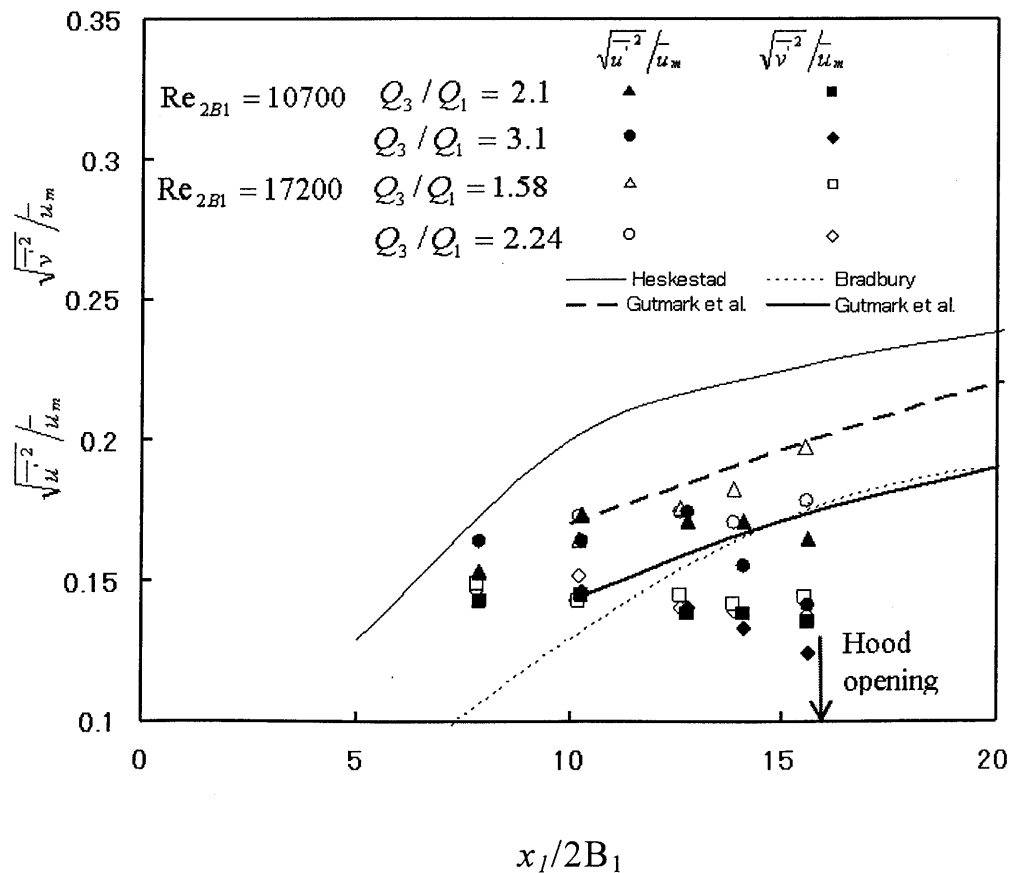


図 4.10 中心軸上の x_l 方向および y_l 方向の乱れ強度

4.5 レイノルズせん断応力

図 4.11 (a), (b)は, $x_1/L = 0.50 \sim 1.00$ において, 横軸に $y_1/b_{1/2}$, 縦軸に無次元レイノルズせん断応力 $\overline{u'v'}/u_m^2$ をとって示した図である. 図中の実線は, Gutmark ら⁽⁸⁾による完全発達した 2 次元噴流の結果である. 図 4.10 で示したように, プッシュプル流れが未発達領域にあるため, Gutmark らの結果と比較して分布全体で値が小さい. そして, 吸い込み口である $x_1/L = 1.00$ では, 吸い込みの影響により, 外周部 ($y_1/b_{1/2} \geq 0.8$) で値が減少していることがわかる. また, 流量比 Q_3/Q_1 が大きいと値がより小さくなっている. これは, フードに近づくほど, また, Q_3/Q_1 が大きいと周囲からの非乱流の誘引空気量が増大するためである.

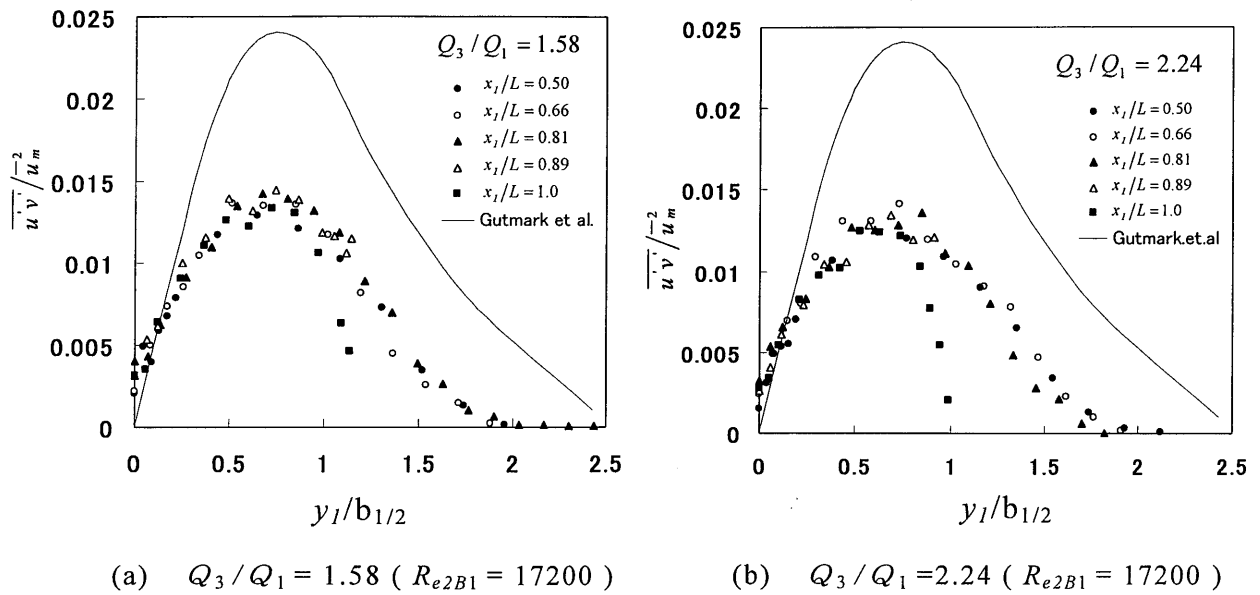


図 4.11 レイノルズせん断応力の分布

4.6 乱れの生成

ここで、プッシュプル流れの乱れの生成項について考察する。

x_1 方向のレイノルズ応力 $\overline{u'^2}$ の生成項 P_{11} および y_1 方向のレイノルズ応力 $\overline{v'^2}$ の生成項 P_{22} は、それぞれ式 (4.1), 式 (4.2) で与えられる。

$$P_{11} = -2\overline{u'^2} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x_1} - 2\overline{u'v'} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y_1} \quad (4.1)$$

$$P_{22} = -2\overline{u'v'} \frac{\partial \overline{v}}{\partial x_1} - 2\overline{v'^2} \frac{\partial \overline{v}}{\partial y_1} \quad (4.2)$$

また、式 (4.1), 式 (4.2) を U_1 と B_1 を用いて無次元化すると式 (4.3), 式 (4.4) となる。

$$P_{11}^* = -2 \frac{\overline{u'^2}}{U_1^2} \frac{\partial(\overline{u}/U_1)}{\partial(x_1/B_1)} - 2 \frac{\overline{u'v'}}{U_1^2} \frac{\partial(\overline{u}/U_1)}{\partial(y_1/B_1)} \quad (4.3)$$

$$P_{22}^* = -2 \frac{\overline{u'v'}}{U_1^2} \frac{\partial(\overline{v}/U_1)}{\partial(x_1/B_1)} - 2 \frac{\overline{v'^2}}{U_1^2} \frac{\partial(\overline{v}/U_1)}{\partial(y_1/B_1)} \quad (4.4)$$

図 4.12 (a), (b) は、式 (4.3) 右辺第 1 項と第 2 項を、実験データをもとに算出した結果である。これらの結果より、 $\overline{u'^2}$ の乱れの生成項 P_{11}^* の第 1 項は、流量比が大きいと値が小さい。第 2 項は流量比が大きいと値が大きい。図 4.12 (c) に $x_1/L=1.00$ における P_{11}^* の分布を示す。流量比による影響が見られ、分布の最大値が $y_1/B_1=3.5$ 付近にある。これは図 4.4 (b) で示した吸い込み口近傍での乱れ強度分布 $\sqrt{\overline{v'^2}}/U_1$ の最大値が $y_1/B_1=3.5$ 付近にある実験結果とよく対応している。

図 4.12 (d), (e) は、式 (4.4) 右辺第 1 項と第 2 項の算出結果である。これらの結果より、 $\overline{v'^2}$ の生成項 P_{22}^* の第 1 項は流量比が大きいと値が大きく、第 2 項も流量比が大きいと値が大きい。したがって、 P_{22}^* は流量比の影響を受け、流量比が大きいほど乱

れの生成が大きい分布になる。 $\sqrt{v^2}/U_1$ には乱れエネルギー再配分項が重要な寄与を与えるため、 P_{22}^* と乱れ強さ分布の間の関連は必ずしも明確ではない。

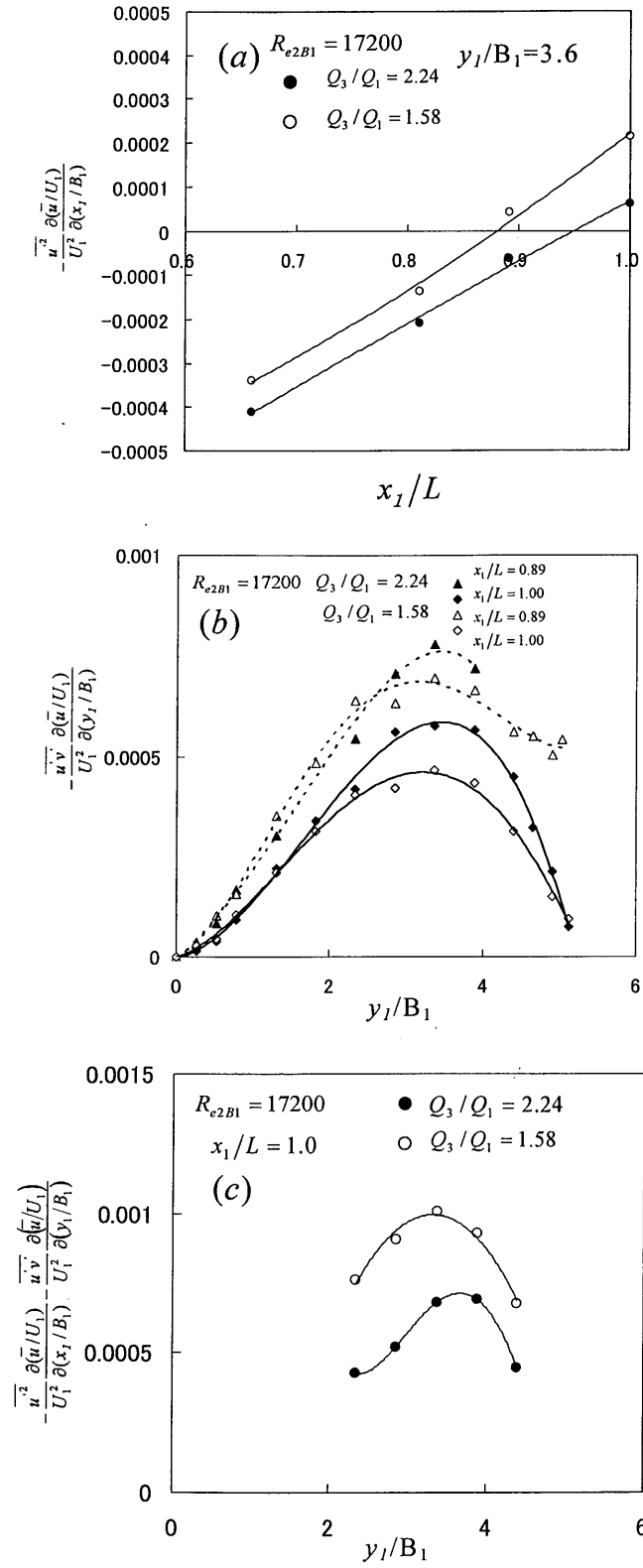


図 4.12 乱れの生成項 P_{11}^*

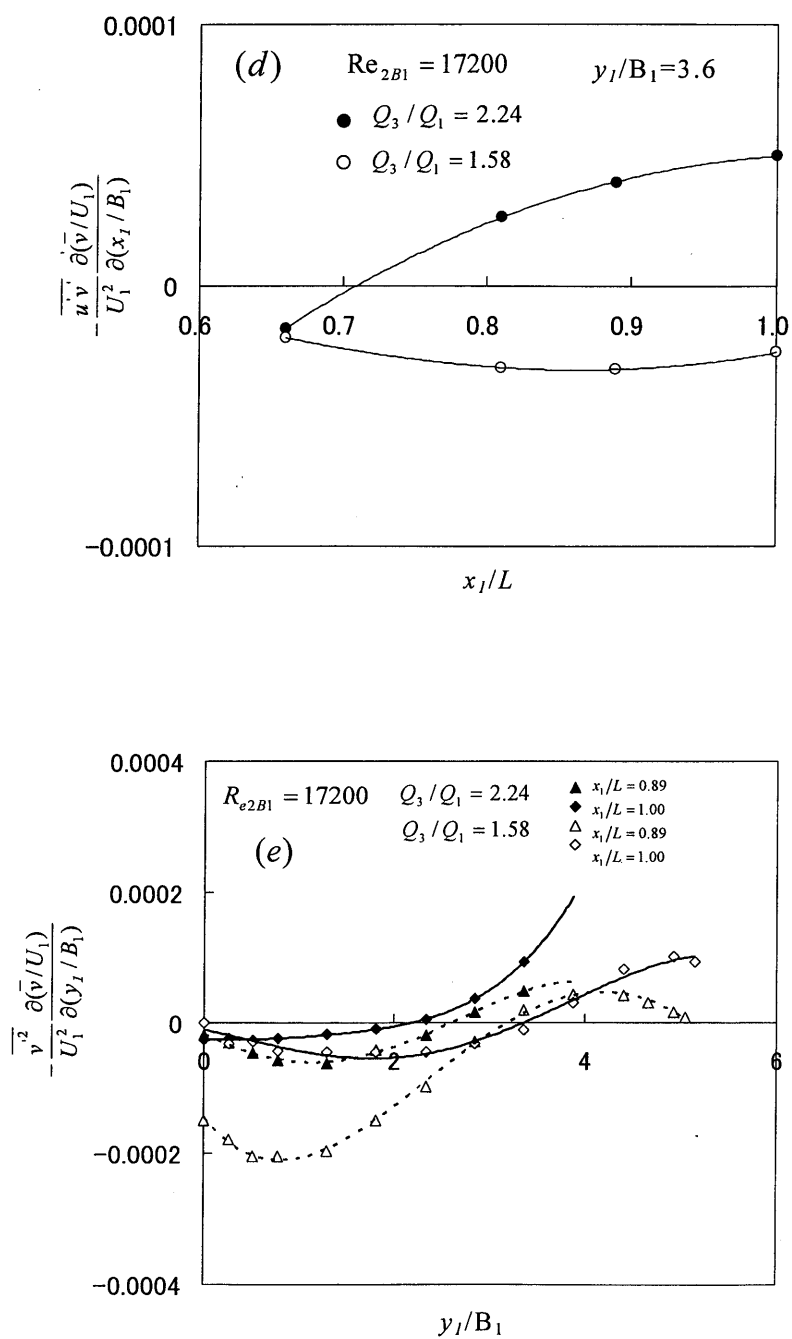


図 4.12 乱れの生成項 P_{22}^*

4.7 第4章のまとめ

プッシュプル流れの乱れ特性が、流量比の影響でどのように相違するのか、また、プッシュプル流れは完全発達した2次元噴流の乱れ特性とどのような相違があるのかについて実験的に考察した結果、以下の結論を得た。

- (1) 吸い込み口近傍では流量比が大きい場合、中心軸から乱流の割合（間欠係数 γ ）が $\gamma = 0.4$ または 0.6 をとるまでの無次元距離 $y_1/b_{1/2}$ が、完全発達した2次元噴流の値より小さく、下流に向かってわずかに減少する。これは、2次元噴流と違い、下流に向かって吸い込みの影響が強くなり速度分布の半値幅が増大するためである。また、流量比が大きい方が非乱流の気流を多くフードに取り込んでいることが分かる。
- (2) x_1 方向乱れ強度 $\sqrt{u^2}/u_1$ の y_1/B_1 に対する分布は、流量比の影響をほとんど受けない。一方、 y_1 方向乱れ強度 $\sqrt{v^2}/u_1$ は、吸い込み口近傍で流量比が大きい場合値が大きくなる。 $\overline{u^2}$ の実験結果は、乱れの生成項の計算結果の大小関係とよく対応している。
- (3) x_1 方向無次元乱れ強度 $\sqrt{u^2}/u_m$ の $y_1/b_{1/2}$ に対する分布は、噴流が未発達であるため完全発達した2次元噴流での結果より値が小さい。また、流量比が大きい場合下流に向かって乱れ強度 $\sqrt{u^2}/u_m$ が減少していく。これは、フード近傍で流れが加速され乱れの生成が減少するためである。一方、 y_1 方向乱れ強度 $\sqrt{v^2}/u_m$ は流量比の影響が小さい。
- (4) 未発達領域にあるプッシュプル流れの中心軸上の無次元乱れ強度 $\sqrt{u^2}/u_m$ は、下流に行くほど流量比の影響が強くなり、流量比が大きい場合その値が小さくなる。また y_1 方向乱れ強度 $\sqrt{v^2}/u_m$ は流量比の影響が小さく、下流に向かって値がわずかに小さくなる。
- (5) レイノルズせん断応力は、吸い込み口の上端（下端）で値が小さくなる。そして、流量比が大きいほど値が小さくなる。これは、フードの周囲から乱れの小さい気流を取り込んでいるためである。

第 5 章⁽¹⁷⁾

流れ特性に及ぼすノズル・フード間距離の影響

ノズル・フード間距離 (L) を, ポテンシャルコア領域を含むような短い距離, 未発達領域を含むような距離, そして, 完全発達領域を含むような長い距離の 3 種類とし, それぞれの L での漏れ限界流量比で運転 (最小エネルギーで運転) した場合の流れ特性の相違について実験的に調査する.

5.1 フード近傍の平均速度

実験装置②を用いて, 2.5.2 節の流量条件で実験を行った.

図 5.1 はノズル・フード間距離 L を変えた場合 ($L=184\text{mm}, 391\text{mm}, 618\text{mm}$) フード近傍の平均速度分布がどのように影響を受け変化するかを示したものである. ノズル・フード間距離が長いほど噴流は下流に向かって発達していくため, フード近傍の速度分布は上下に広がった分布形となる. この噴流がフードに吸い込まれる. なお, 図中の点線はフード開口部の下端位置を表している. 図 5.2 は縦軸に \bar{u}/\bar{u}_m をとって図 5.1 を整理しなおしたものである. $L=184\text{mm}, 391\text{mm}$ の場合, 下流に向かって分布が広がって行くが, $L=618\text{mm}$ の場合, 分布の変化が極めて小さい. これは, 強い吸い込みの影響により, 噴流の広がりが抑制されているためである.

5.2 噴流の中心軸上速度と半値幅

ノズルからフードまでの噴流中心軸上の速度および半値幅の下流への変化をそれぞれ図 5.3 (a), (b) に示す. 図 5.3(a) 中の太い実線は, Goldschmidt ら⁽¹⁴⁾ の, 図 5.3(b) 中の太い実線は Miller ら⁽⁸⁾ の 2 次元噴流の場合の結果である. $L=391\text{mm}$ ($L/2B_1 = 17.0$), $L=618\text{mm}$ ($L/2B_1 = 26.9$) の場合, 中心軸上速度が下流に向かって減速した後, 吸い込みの影響でフードに向かって加速する領域が見られる. また, ノズル・フード間距離が長くなると, $L=391\text{mm}$ および $L=618\text{mm}$ それぞれのフード近傍において半値幅の増加率が減少する領域が見られる. この領域は図 5.3(a) で示した加速領域と対応している.

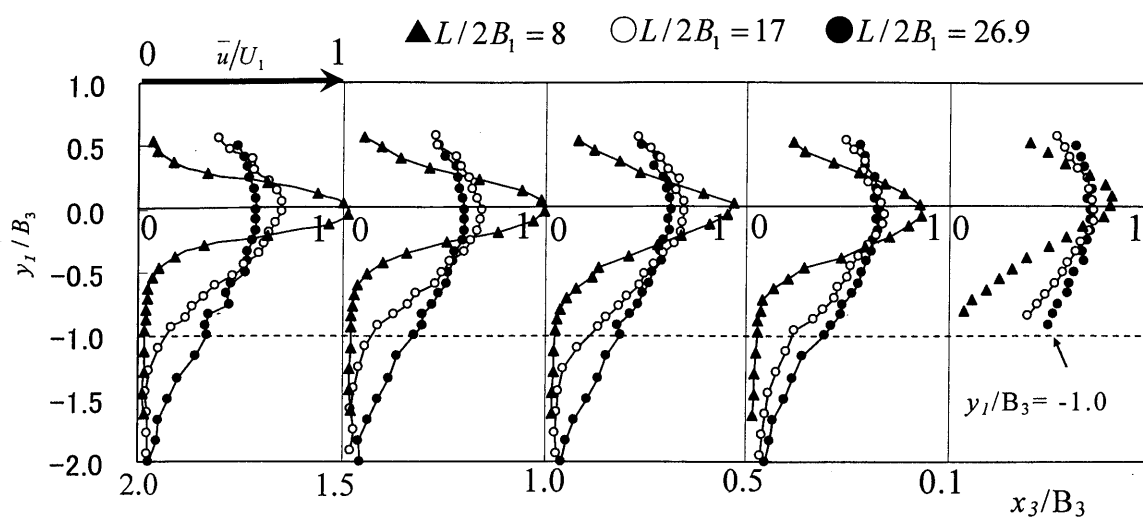


図 5.1 フード近傍の x_1 方向の平均速度分布 \bar{u}/U_1

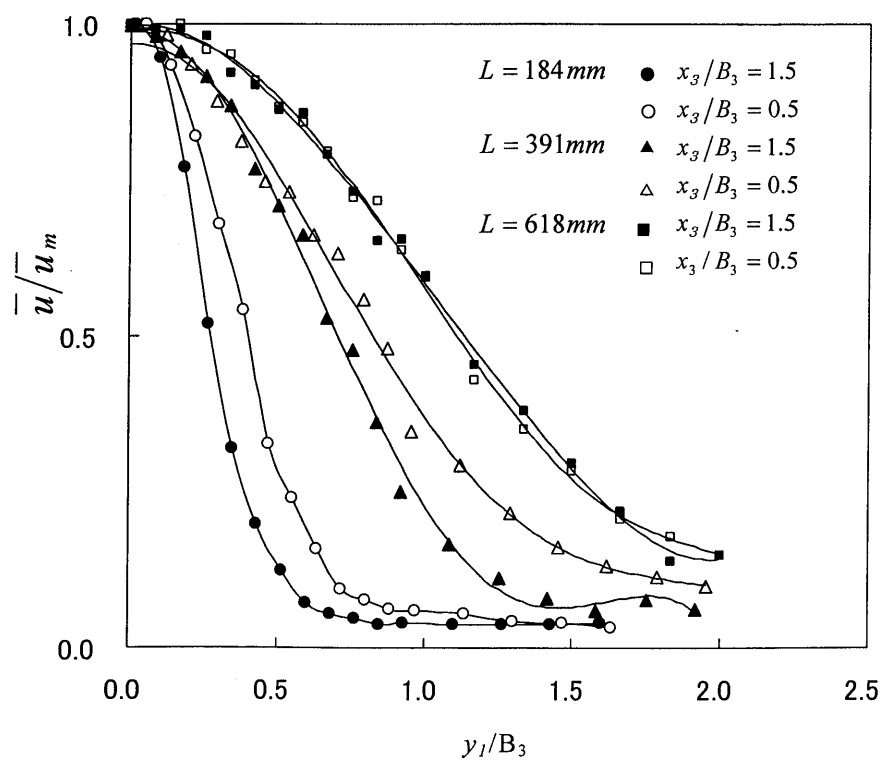


図 5.2 フード近傍の x_1 方向の平均速度分布 \bar{u}/\bar{u}_m

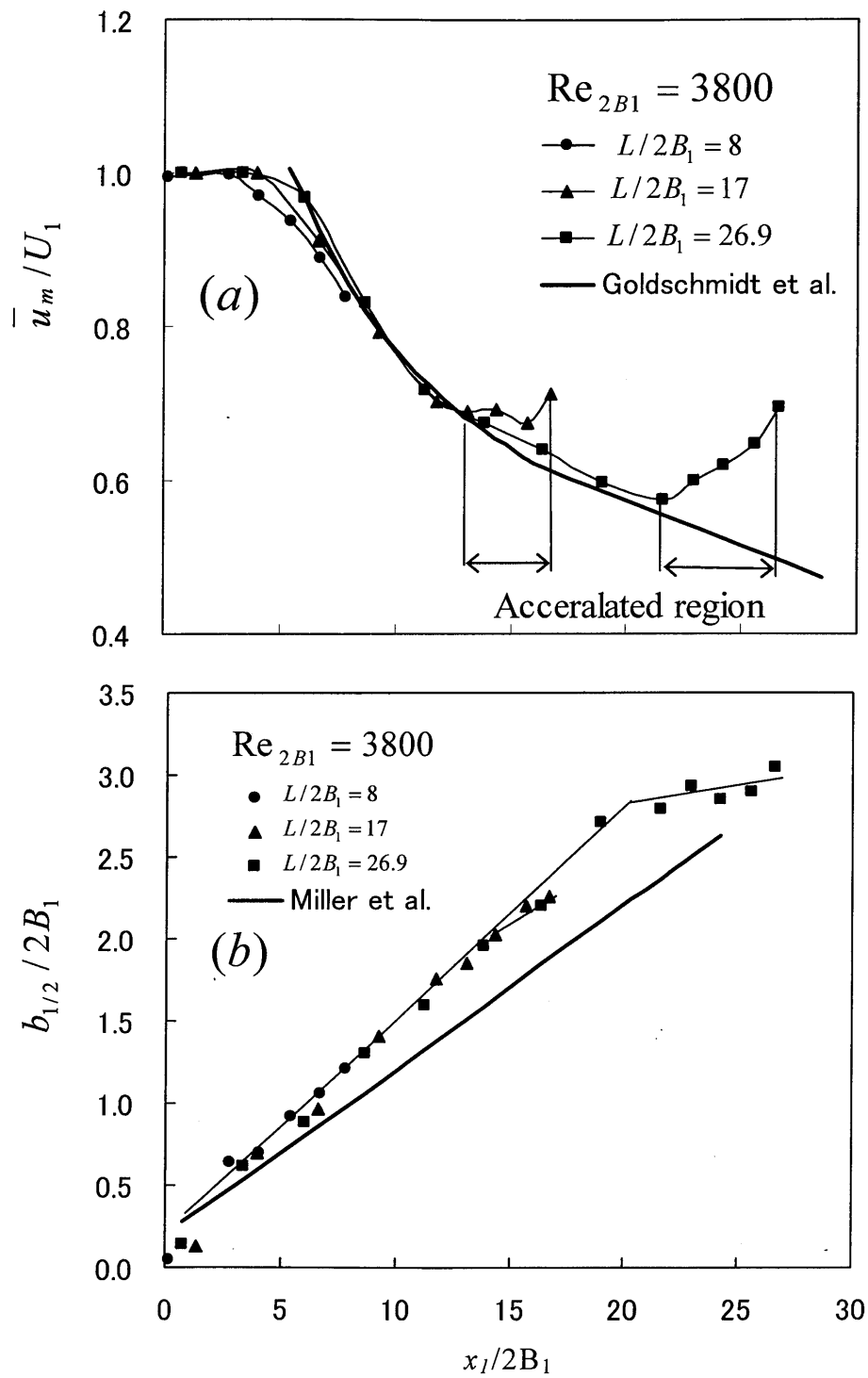


図 5.3 噴流中心軸上の速度と半値幅の下流への変化

5.3 ノズル・フード間の流量変化および変化率

図 5.4 は、各測定断面の噴流中心軸上の速度分布から、2次元性を仮定した場合の測定断面の流量を Q とし、流量比 Q/Q_1 がノズルからフードに向かってどのように変化していくかを表したものである。また、図中の太い実線は新津ら⁽⁶⁾による2次元噴流の結果である。ノズル近傍の流量比が2次元噴流での結果と比べて急激に増大している。これは、新津らの実験装置のノズル部にはフランジがあるのに対し、本実験装置には無いため、ノズル上流からの気流の誘引が増大するためであると考えられる。また、噴流のエントレイメントにより全般に下流に向かい流量比 Q/Q_1 が増大している。 $L=391\text{mm}$, 618mm の場合、フード近傍の加速領域で吸い込みの影響により流量比 Q/Q_1 がフードに向かって急激に増大しているが $L=184\text{mm}$ ではこのような傾向が見られない。これは $L=184\text{mm}$ での K_{L0} の値が小さく吸い込み量が少ないためである。 $L=391\text{mm}$, 618mm の場合、フード開口位置における流量比 Q/Q_1 の値がそれぞれの実験条件である $Q_3/Q_1=2.5$ あるいは 3.1 より大きい理由は、噴流の2次元性を仮定して、 $z_f=0\text{mm}$ での各断面の速度分布から Q/Q_1 を求めているためである。

図 5.5 は図 5.4 で示した流量比 Q/Q_1 の下流への変化率が、ノズルからフードに向かってどのように変化していくかを表したものである。この変化率は、噴流周囲の空気を噴流内に誘引するエントレイメント速度に対応するものである。また、図中の太い実線は新津らによる2次元噴流の結果である。2次元噴流は $x_f/2B_1 \leq 30$ で値がほぼ一定である⁽⁶⁾。これは、噴流周囲からのエントレイメント速度が一定であることを表している。一方、プッシュプル流れの場合、 $L=184\text{mm}$ では2次元噴流と同様であるが、 $L=391\text{mm}$, 618mm の場合、フード近傍では強い吸い込みの影響により流れが加速されエントレイメント速度が増大していく。したがって、ノズル・フード間距離 L が 391mm ($L/2B_1 = 17$) 以上の場合、フード近傍において周囲の空気(有害ガス)をより多く取り込むことができる。

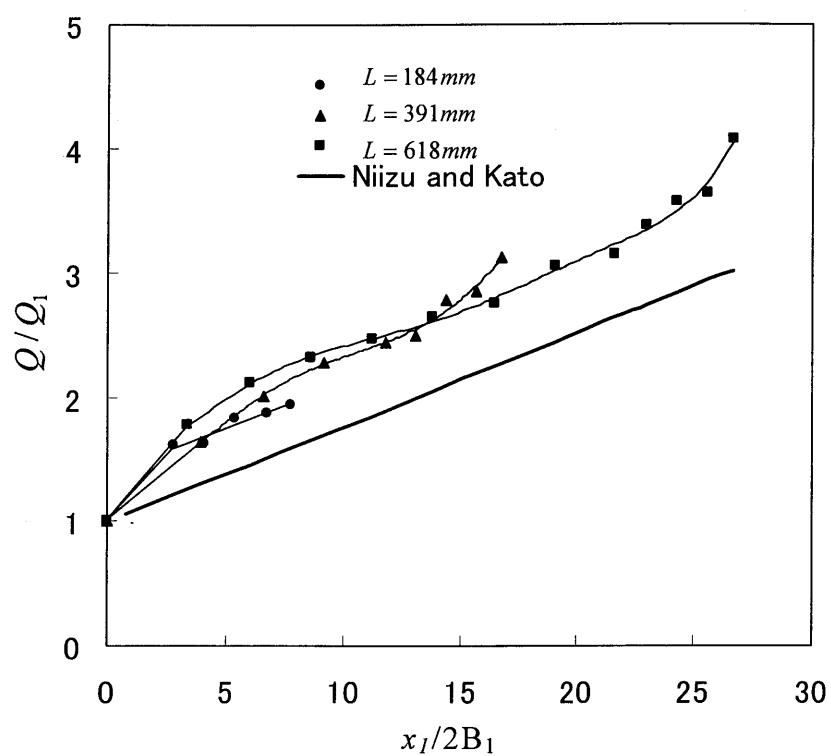


図 5.4 流量比 Q/Q_1 の下流への変化

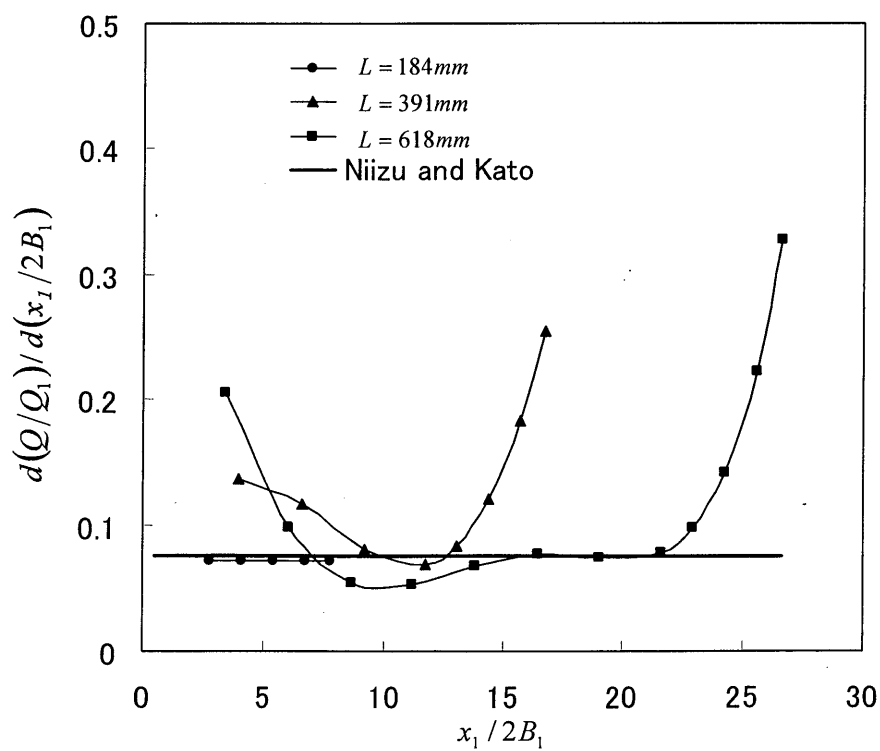


図 5.5 流量比 Q/Q_1 の下流への変化率

5.4 噴流中心軸上の乱れ強度

図 5.6 は、噴流中心軸の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_m$ および $\sqrt{v'^2}/u_m$ がノズルからフードまでどのように変化していくのかを表したものである。また、図中の太い実線と点線は、Gutmark ら⁽⁸⁾の 2 次元噴流の結果である。2 次元噴流の場合、ノズルから噴出した噴流は下流に向かって発達しながら乱れ強度が増大してゆき、完全発達領域では、 x_l 方向および y_l 方向でそれぞれおよそ 0.26, 0.20 の一定値となる⁽⁸⁾。プッシュプル流れの場合、下流に向かって発達しながら乱れ強度が増加していくが、 $L/2B_1=17$, 26.9 の場合、それぞれ $x_l/2B_1 \cong 8$ および $x_l/2B_1 \cong 12$ より下流において、強い吸い込みの影響で逆に乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_m$, $\sqrt{v'^2}/u_m$ が減少していく。特に、 $\sqrt{u'^2}/u_m$ がフード近傍の加速領域 ($L/2B_1 \cong 22$) で大きく減少し、その値が $\sqrt{v'^2}/u_m$ に近づく。しかし、 $L/2B_1=8$ の場合は、流量比が小さいため吸い込みの影響が小さく、乱れ強度が減少していない。

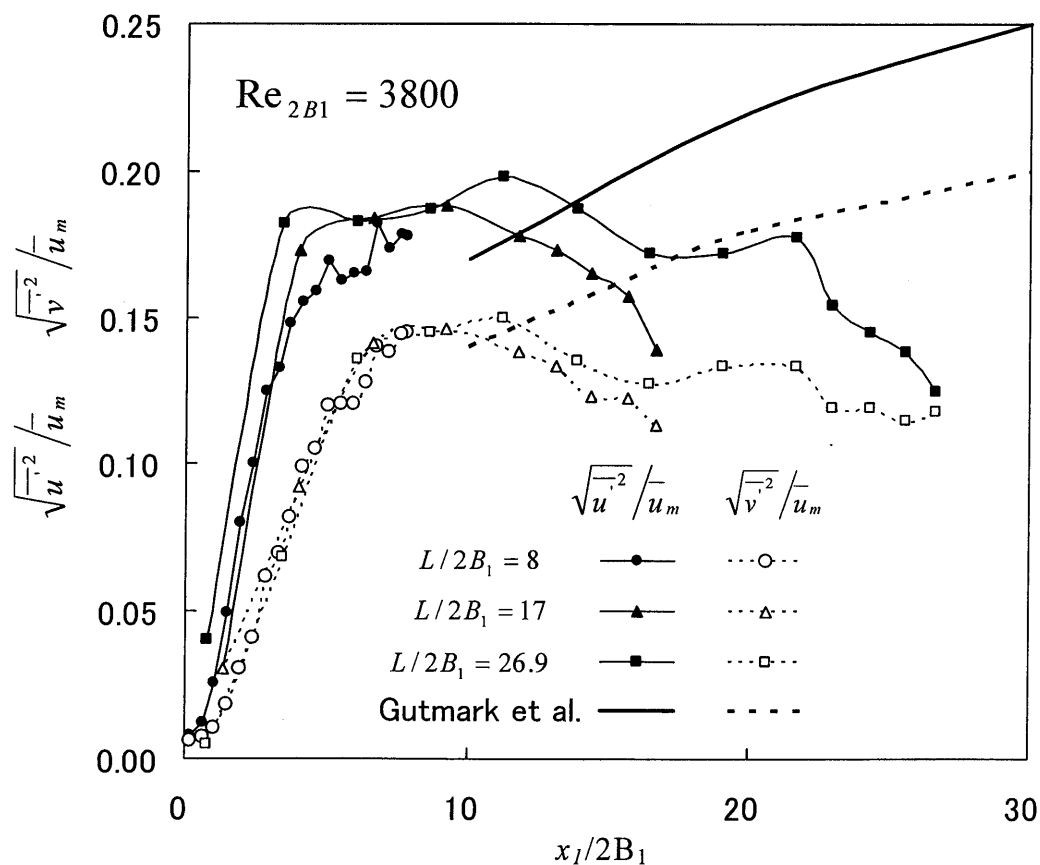
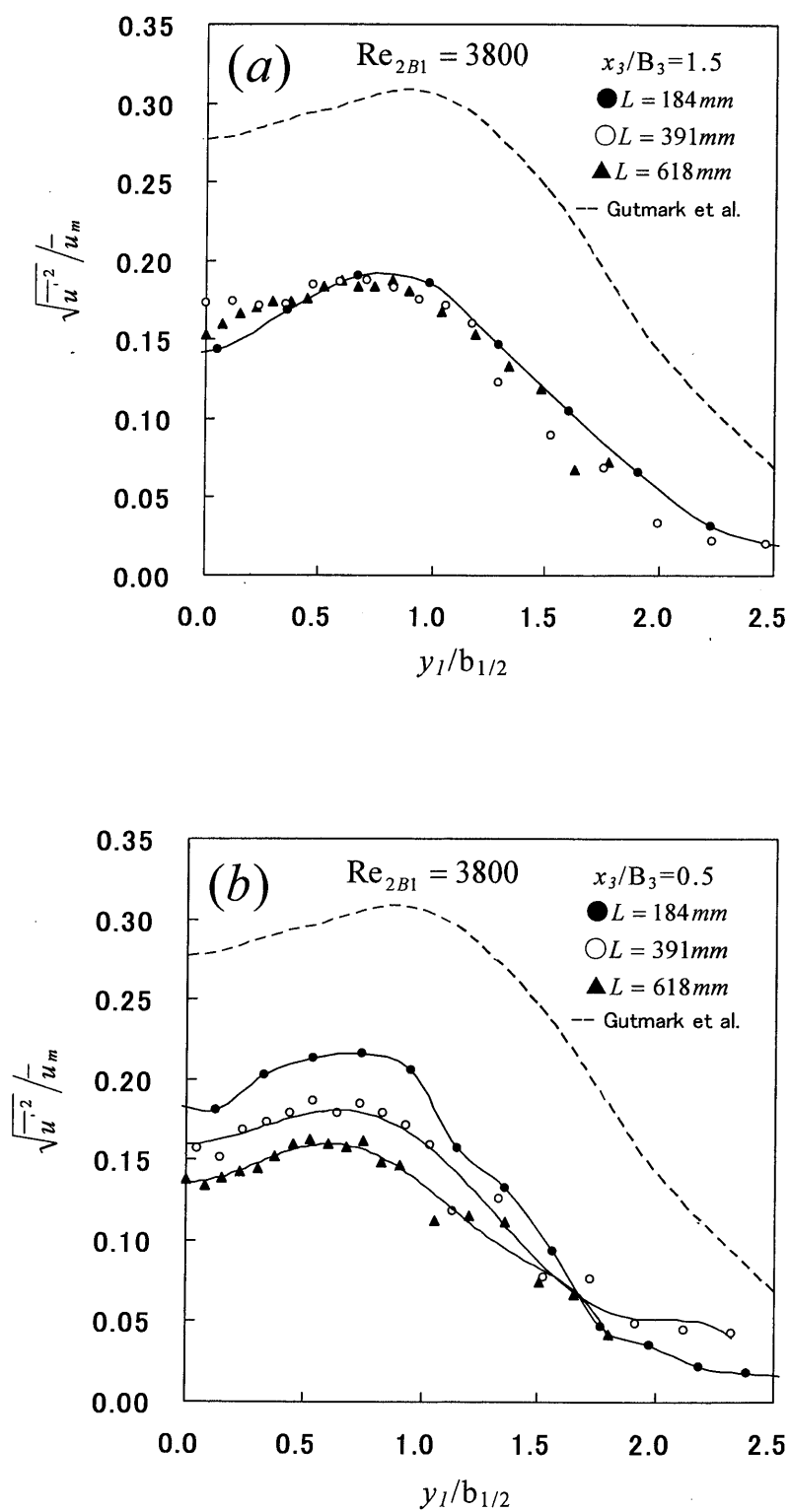


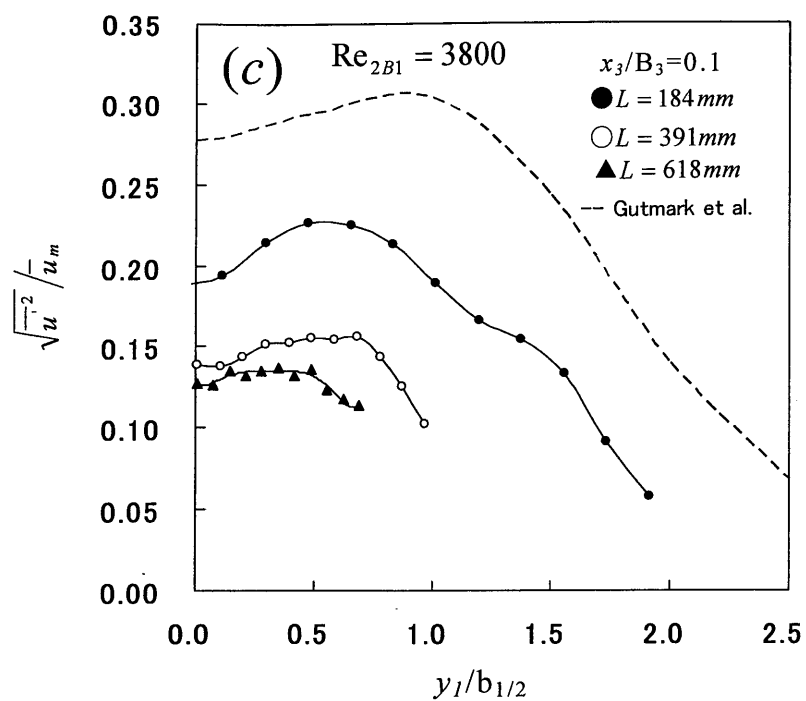
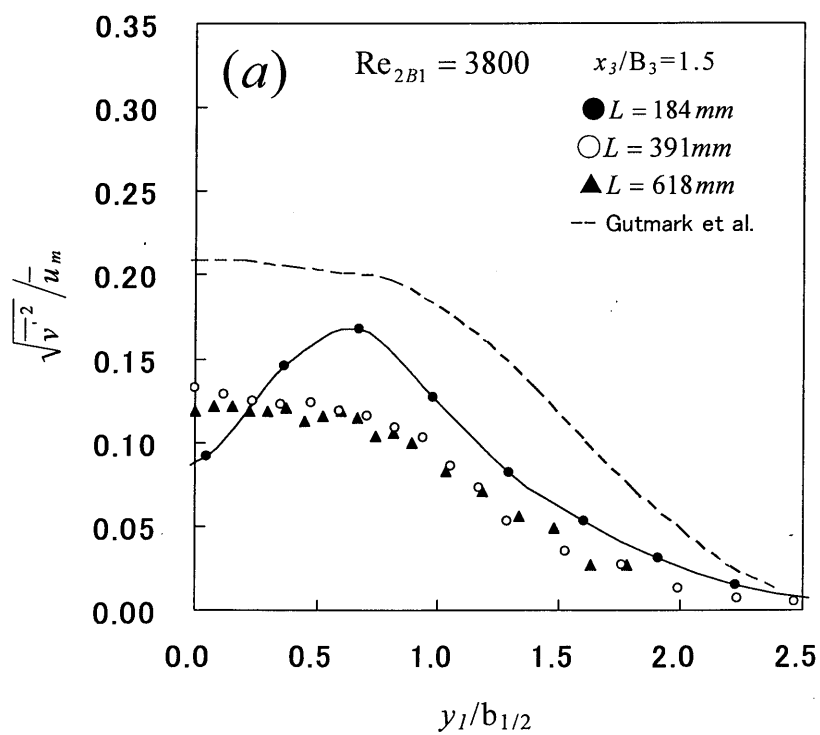
図 5.6 x_l 方向および y_l 方向の乱れ強度の下流への変化

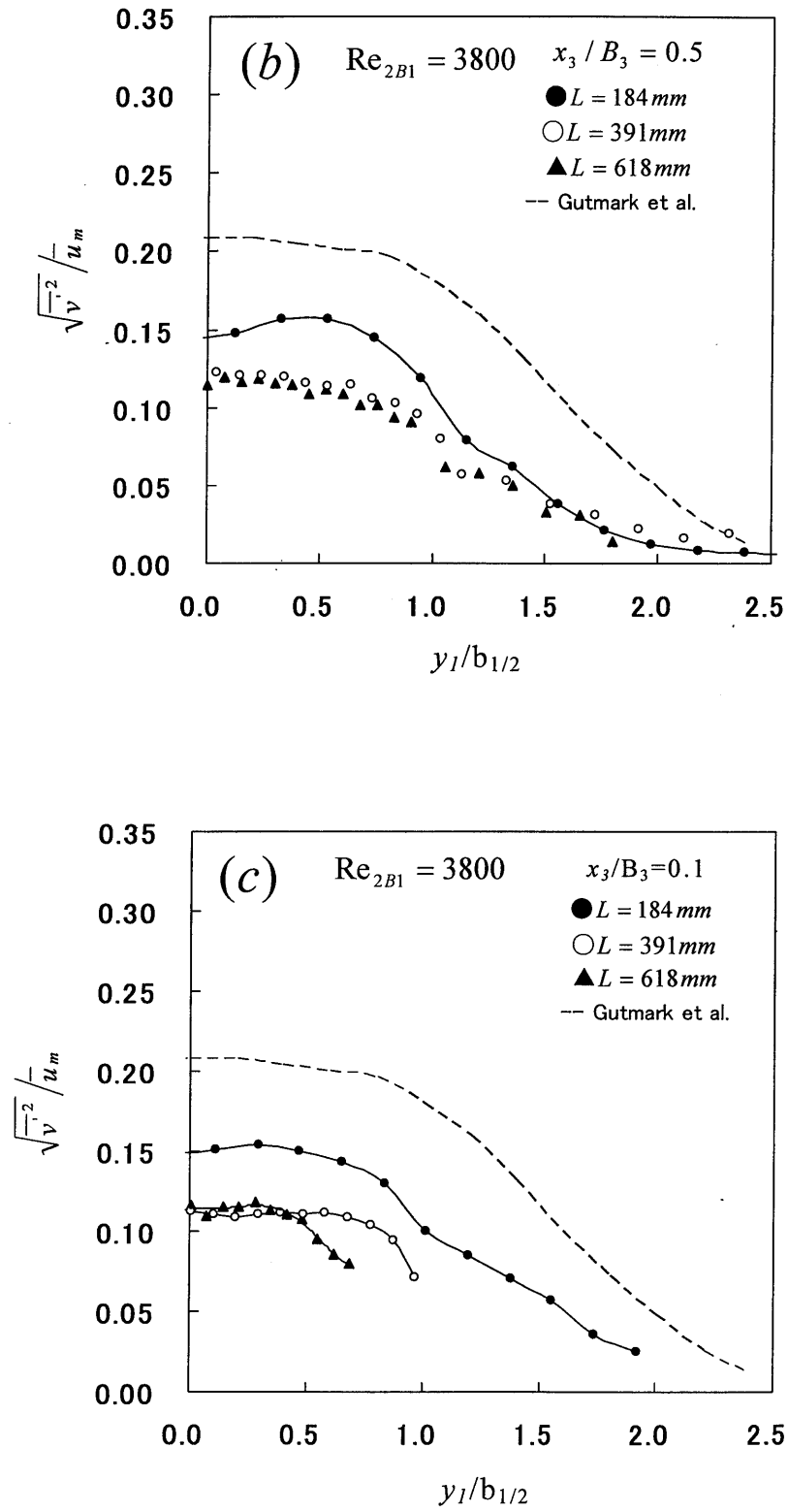
5.5 フード近傍の乱れ強度

図 5.7 (a) ~ (c) は, フード近傍の x_3/B_3 が異なる位置における x_1 方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_m$ の分布を示したものである. 図中の破線は, 完全発達した 2 次元噴流に関する Gutmark ら⁽⁸⁾ の結果である. フードから上流 $x_3/B_3=1.5$ の位置では分布形が L によらずほぼ同じであるが, これより下流では L による相違が表れる. すなわち $x_3/B_3=0.5$ では, 噴流中央部 ($y_1/b_{1/2} \geq -1.5$) で L が長くなるほど乱れが小さくなる. さらに下流の $x_3/B_3=0.1$ では, その傾向が顕著である. これは, L が長いほどフード近傍で流れが加速されるため, $\overline{u'^2}$ の乱れの生成が減少するためである⁽¹⁶⁾.

図 5.8 (a) ~ (c) は, フード近傍における y_1 方向の乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/u_m$ の分布を示したものである. フードから上流 $x_3/B_3=1.5$ の位置では, $L=184\text{mm}$ の場合, 噴流が未発達であるため中心軸上の乱れが小さい. 一方, $L=391\text{mm}$ および 618mm の場合, フード開口直前の $x_3/B_3=0.1$ で L による相違が見られる. すなわち, $y_1/b_{1/2} \leq -0.5$ の領域では, L が長いほど $\sqrt{v'^2}/u_m$ の値が小さくなっている. これは, 強い吸い込みの影響で周囲の非乱流空気を多く吸い込んでいるためであると考えられる.

Fig. 5.7 x_1 方向の乱れ強度分布

Fig. 5.7 x_1 方向の乱れ強度分布Fig. 5.8 y_1 方向の乱れ強度分布

Fig. 5.8 y_1 方向の乱れ強度分布

5.6 レイノルズせん断応力

図 5.9 (a) ~ (c) は, フード近傍におけるレイノルズせん断応力の分布を, 横軸に $y_1/b_{1/2}$ をとって表したものである. また, 図中の太い実線は Gutmark ら⁽⁸⁾ の 2 次元噴流の結果である. $x_3/B_3=1.5$ では, L によらず分布形が同じである (図 5.9 (a)). しかし, 下流に向かって L による相違が見られる. すなわち, L が長くなるほど $\overline{u'v'}/\overline{u_m}^2$ の値が小さくなる (図 5.9(b), (c)).

図 5.10 は, 図 5.9 (b) の横軸に y_1/B_3 をとって整理しなおしたものである. 分布形に L による相違が見られ, $-\overline{u'v'}/\overline{u_m}^2$ の分布形および最大値をとる位置が異なる.

ここで, プッシュプル流れのレイノルズせん断応力の生成項について考察する. レイノルズせん断応力 $-\overline{u'v'}$ の生成項 P_{12} は, 式 (5.1) で与えられる.

$$P_{12} = \overline{u'^2} \frac{\partial \overline{v}}{\partial x_1} + \overline{v'^2} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y_1} \quad (5.1)$$

また, 式 (5.1) を U_1 と B_3 で無次元化すると式 (5.2) となる.

$$P_{12}^* = \frac{\overline{u'^2}}{\overline{u_m}^2} \frac{\partial(\overline{v}/\overline{u_m})}{\partial(x_1/B_3)} + \frac{\overline{v'^2}}{\overline{u_m}^2} \frac{\partial(\overline{u}/\overline{u_m})}{\partial(y_1/B_3)} \quad (5.2)$$

式 (5.2) において第 1 項は, 実験結果により, $\overline{v}/\overline{u_m}$ の下流への変化が極めて小さいので, 第 2 項が支配的であると考えられる. 図 5.11 に $x_3/B_3=0.5$ における異なる L での式 (5.2) 第 2 項の計算結果を示す. この結果より, レイノルズせん断応力 $-\overline{u'v'}$ の生成項 P_{12}^* は, ノズル・フード間距離が長いと値が小さく, レイノルズせん断応力の大小関係と対応している.

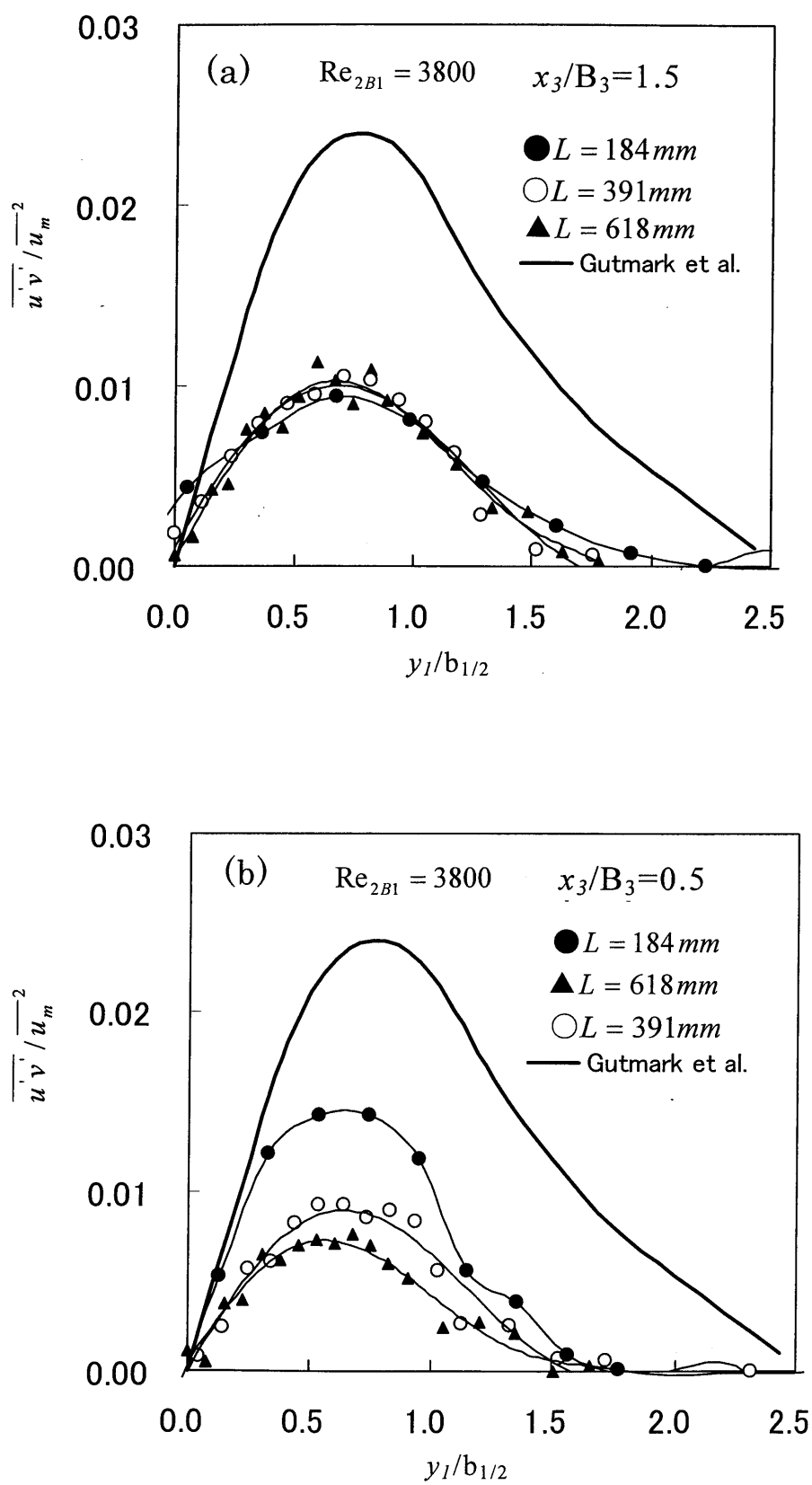


図 5.9 フード近傍におけるレイノルズせん断応力の分布

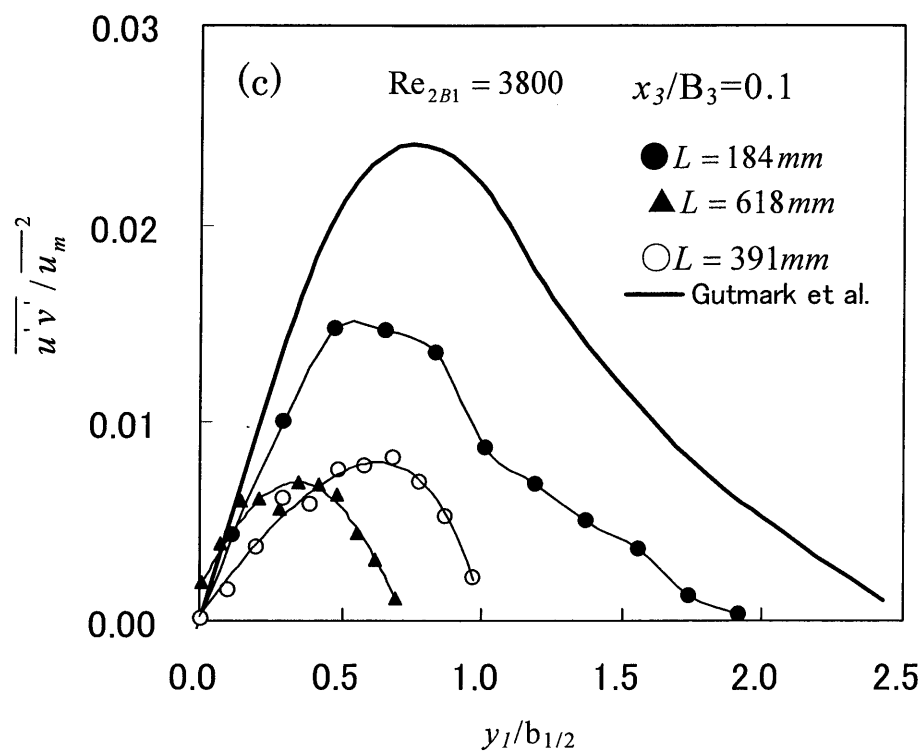


図 5.9 フード近傍におけるレイノルズせん断応力の分布

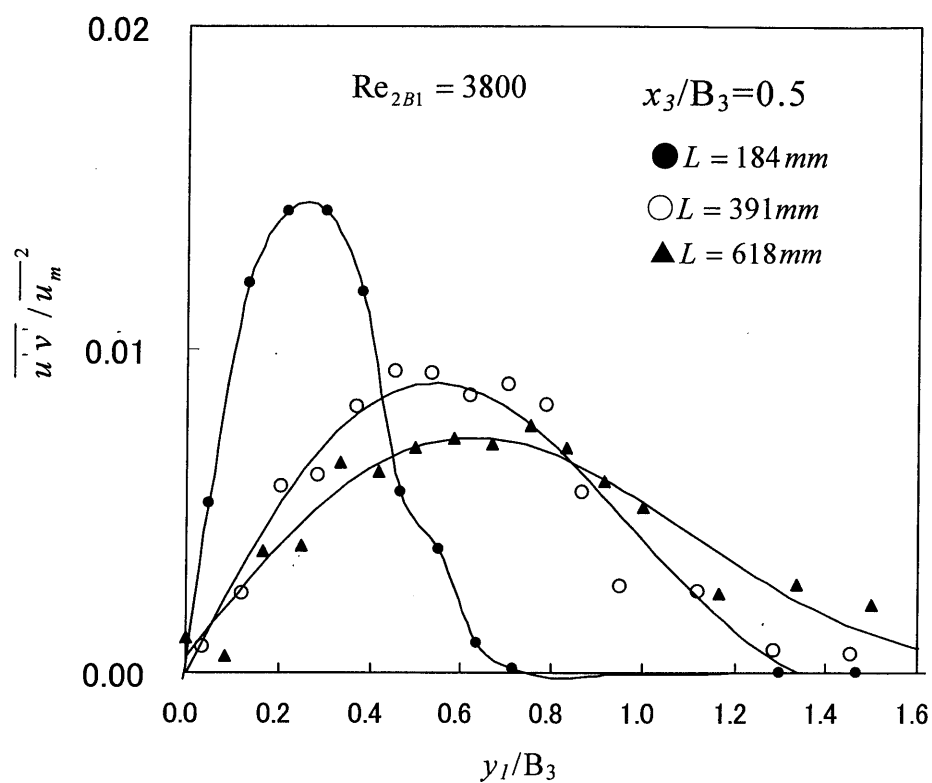


図 5.10 フード近傍の $x_3/B_3 = 0.5$ におけるレイノルズせん断応力の分布

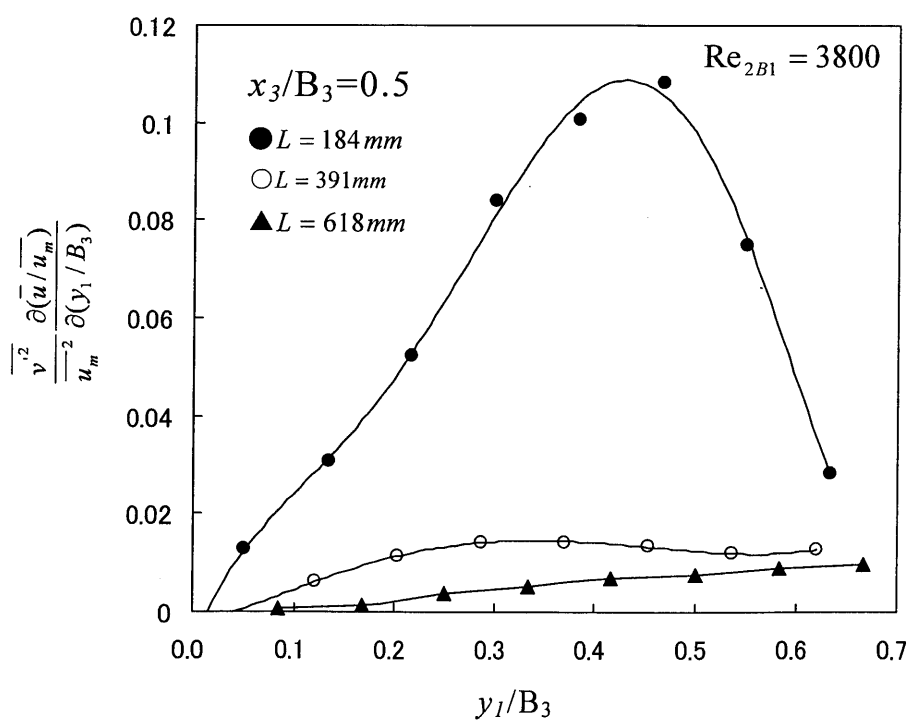


図 5.11 レイノルズせん断応力の生成項

5.8 第5章のまとめ

ノズル・フード間距離を変えて、それぞれの漏れ限界流量比で運転したときのノズル・フード間の流れ特性への無次元距離 $L/2B_1$ の影響を実験的に考察した結果、以下の結論を得た。

- (1) ノズル・フード間距離が異なっても、半値幅の下流への増加率が一定の領域があるが、無次元ノズル・フード間距離が $L/2B_1 \geq 17$ では、強い吸い込みによるフード近傍の加速領域で、半値幅の下流への増大が抑制される。
- (2) 無次元ノズル・フード間距離が $L/2B_1 \geq 17$ では、フード近傍の加速領域でエントレイメント速度が増大する。したがって、アスペクト比が 10 程度の噴出しノズルの場合、無次元ノズル・フード間距離 $L/2B_1$ は 17 以上とすることが装置設計上望ましい。
- (3) 無次元ノズル・フード間距離が $L/2B_1 \geq 17$ でのフード近傍での加速領域では、噴流軸中心上の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_m$ およびその分布全体の値が下流に向かって小さくなる。
- (4) ノズル・フード間距離が長いほどフード近傍でレイノルズせん断応力 $\overline{u'v'}/u_m^2$ が下流に向かって減少する。これは、 $-\overline{u'v'}$ の生成項の計算結果の大小関係とよく対応している。

第 6 章

結論

本研究では、従来の装置と比べてエネルギー消費が少ない、噴き出し気流に噴流幅の薄い 2 次元噴流を用いた新しいプッシュプル完全局排装置を作製し、ノズルから噴出した気流が周囲の空気を誘引しながらフードに吸い込まれるまでのプッシュプル流れの流れ特性について調べた。特に、これまで個別に研究されてきた 2 次元噴流の流れ特性およびフードによる吸い込み流れの特性との相違について実験的に考察し、有害ガスの効果的な捕捉のための基礎資料を得た。以下に本研究で明らかになったことを総括する。

第 3 章はノズル・フード間距離が一定 ($L/2B_1=15.7$) のとき、漏れ限界流量比よりも小さい流量比の場合と、それよりも大きい場合のそれぞれについて、プッシュプル流れの平均速度場の特性に及ぼす流量比の影響について調査し、以下の結論を導いた。

x_1 方向の速度成分 \bar{u} の分布にフードによる吸い込みの影響が表れるのは、 $x_1/L \geq 0.5$ (L はノズル・フード間距離) であることが分かった。したがって、プッシュプル流れの下方で発生する有害ガスを含む気流の位置を $x_1/L \geq 0.5$ とすれば、効率よく除去・排出することができる。

プッシュプル流れは吸い込みの影響により噴流中心軸上の平均速度成分の最大値 \bar{u}_m と、この分布の半値幅 $b_{1/2}$ が 2 次元噴流の値より大きいことが明らかになった。これは、吸い込みの影響でプッシュプル流れの外周部の速度が 2 次元噴流より大きく、有害ガスの取り込みが 2 次元噴流より優れていることを意味している。そして、フードに近づくほど x_1 方向の速度成分が大きくなるので、有害ガスを取り込んだ気流を素早くフードに吸い込むことができる。

有害ガスをフードに吸引させる効果に関して、プッシュプル流れのフード開口への流入の様子とフードのみによる吸引の様子とを比較し、プッシュプル流れはフードのみによる吸い込みよりも上流で発生した有害ガスを捕捉できることを明らかにした。これは、少量の噴き出し空気で大範囲の有害ガスが捕捉できることを意味している。

横軸に $y_1/b_{1/2}$ をとった場合の噴流中心軸に垂直な y_1 方向の無次元速度成分 \bar{v}/\bar{u}_m

の分布形が、静止空気中へ噴出する 2 次元噴流の場合相似形となる。しかし、プッシュプル流れの場合、フード近傍の $x_f/L \geq 0.81$ では、フードによる吸い込みの影響により速度ベクトルの向きが下流に向かって変化する。そのため、分布が相似形とはならないことが明らかになった。

第 4 章では乱れ特性として、乱れ強度、レイノルズせん断応力、乱れの間欠性を取り上げ、ノズル・フード間距離が一定 ($L/2B_1=15.7$) のとき、これらの流れ方向の変化を調べ、吸い込みがどのようにプッシュプル流れの乱れ構造に影響するのか、また、静止空気中に噴出する 2 次元噴流とどのように相違するかについて調査し、以下の結論を導いた。

プッシュプル流れ外周部の乱れの間欠性は、フードによる吸い込みの影響により完全発達した 2 次元噴流外周部の乱れの間欠性と相違することが分かった。無次元平均速度分布が流量比の影響を受ける領域では、無次元値 $y_f/b_{1/2}$ に対する間欠係数 γ の分布において、流量比が大きいと γ の値が小さく、分布が噴流軸側に寄る。これは、流量比が大きいと噴流周囲から非乱流の空気をより多く誘引するためである。

x_f 方向乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_f$ の y_f/B_1 に対する分布は、流量比の影響を受けず、吸い込み口では $y_f/B_1=3.5$ 付近に最大値をとることが分かった。一方、 y_f 方向乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/u_f$ は、吸い込み口近傍で流量比が大きい場合その値が大きくなる。 u'^2 の実験結果は乱れの生成項と対応することが明らかになった。

$\sqrt{u'^2}/u_m$ の $y_f/b_{1/2}$ に対する分布は、流量比が大きい場合下流に向かって値が減少していく。これは、フード近傍で流れが加速され乱れの生成が減少するためである。一方 $\sqrt{v'^2}/u_m$ は流量比の影響が小さいことが分かった。未発達領域にあるプッシュプル流れの中心軸上の $\sqrt{u'^2}/u_m$ は、下流に行くほど流量比の影響が強くなり、流量比が大きい場合その値が小さくなる。また、 $\sqrt{v'^2}/u_m$ は流量比の影響が小さく、下流に向かって値がわずかに小さくなることが分かった。

レイノルズせん断応力は、吸い込み口の上端(下端)で値が小さくなる。そして、流量比が大きいほど値が小さくなることが分かった。これは、強い吸い込みによりフードの周囲から乱れの小さい気流をより多く取り込んでいるためである。

第 5 章ではノズル・フード間距離 (L) を、ポテンシャルコア領域を含む短い距離、未発達領域を含む距離、そして、完全発達領域を含む長い距離の 3 種類とし、それぞれの L での漏れ限界流量比で運転(最小エネルギーで運転)した場合、ノズル・フード間の流れ特性にノズル・フード間距離がどのような影響を及ぼすのか、また、2 次元噴流とどのように相違するかについて調査し、以下の結論を導いた。

ノズル・フード間距離が異なっても漏れ限界流量比で運転した場合、無次元ノズ

ル・フード間距離が $L / 2B_1 < 17$ では、半値幅は下流に向かって一定の割合で増大する。しかし、 $L / 2B_1 \geq 17$ では、強い吸い込みによりフード近傍で流れが加速され、その加速領域で半値幅の下流への増大が抑制されることが分かった。

$L / 2B_1 \geq 17$ では、フード近傍の加速領域でエントレイメント速度が増大し、より多くの有害ガスを取り込もうとする。したがって、アスペクト比が 10 程度の噴出しノズルの場合、無次元ノズル・フード間距離 $L / 2B_1$ は 17 以上とすることが装置設計上望ましいことが分かった。

$L / 2B_1 \geq 17$ でのフード近傍での加速領域では、乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_m$ が下流に向かって小さくなることが分かった。

ノズル・フード間距離が長いほどフード近傍でレイノルズせん断応力 $\overline{u'v'}/u_m^2$ が下流に向かって減少する。そして、 $\overline{u'v'}$ の生成項とよく対応することを示した。

参考文献

- (1) Taro Hayashi, Masaru Shibata, Hiroshi Sakurai, Kiyoyuki Kanehara, Researches on Characteristics and Design of Push-Pull Hoods, Part2, Two-Dimensional Push-Pull Hoods, *J. of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.9, (1979), pp. 29-37.
- (2) Katsuhiko Tsuji, Push-Pull Ventilation as a Measure against Fume Sources, *J. of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, No.45, (1991), pp.85-94.
- (3) David J. Huebener and Robert T. Hughes, Development of Push-Pull Ventilation, *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, Vol. 46, (1985), pp. 262-267.
- (4) Yasushi Niizu and Taro Hayashi, *J. of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, Vol.38, No.1, (1964), pp.20-38.
- (5) Sumio Yamaguchi, Hiroshi Ochi, Yasuhiro Ohtsubo, Yoshihisa Kamada, Masahiro Inoue, Effect of Geometry of Two-Dimensional Hood on Flow Field of Local Exhaust Ventilation, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol. 57, No. 90 (1991), pp. 1562-1566.
- (6) Yasushi Niizu, Takao Kato, Researches on Performance and Design of Air Curtain, (7th Report) Some Practical Examples of Air Curtain and Discussion on Wind Pressure, *J. of the Society of Heating, Air-Conditioning and Sanitary Engineers of Japan*, Vol.35, No.4, (1960), pp. 273-283.
- (7) Haruo Saito, Masahiro Sugihara, Experimental Studies on the Air Curtain, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 29, No. 204 (1963), pp. 1325-1336.
- (8) Gutmark, E. and Wagnanski, I., The planar turbulent jet, *J. Fluid Mech.*, Vol.73, part3, (1976), pp. 465-495.
- (9) Bradbury, L.J.S., The Structure of a self-preserving turbulent plane jet, *J. Fluid Mech.*, Vol.23, part1, (1965), pp.31-64.
- (10) Heskestad, G., Hot-Wire Measurements in a Plane Turbulent Jet, *J. of Applied Mechanics*, Vol.32, No.4, (1965), pp. 721-734.
- (11) JIS Z 8762 (Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzle and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full)
- (12) Nakabayashi Koichi, Yukihiro Hattori, Etsuro Naito, Yoshinori Watanabe, Investigation to Produce Two-dimensionally Uniform Plane Push Jet, *Bulletin of Aichi University of Technology*, Vol.4, (2007), pp. 23-26.
- (13) Silverman, L., *J. Ind. Hyg. Tox.*, 24(1942), pp. 267-276.
- (14) Goldschmidt, V.W., Young M.F., Ott E.S., Turbulent convective velocities (broadband and wavenumber dependent) in a plane jet, *J. Fluid Mech.*, Vol. 105, (1981), pp. 327-345.
- (15) Koichi Nakabayashi, Hattori Yukihiro, Basic Study on Perfect Push-Pull Local Ventilation (1st report, Leakage Limit Flow Ratio and Characteristics of Push-Pull Flow, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.75(2009), pp. 1076-1083.
- (16) Yukihiro Hattori, Koichi Nakabayashi, Osami Kitoh and Motoyuki Ito, Basic Study on Perfect Push-Pull Local Ventilation (2nd report, Turbulent Characteristics of Push-Pull Flow, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.76 (2010), pp.(to appear)

- (17) Yukihiro Hattori, Koichi Nakabayashi, Osami Kitoh and Motoyuki Ito, Basic Study on Perfect Push-Pull Local Ventilation (3rd report, An Influence of the Distance between Nozzle and Hood on Flow Characteristics of Push-Pull Flow, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, (under reviewing)
- (18) Yukihiro Hattori, Koichi Nakabayashi, Osami Kitoh and Motoyuki Ito, Basic Study on Perfect Push-Pull Local Ventilation, *13th Asian Congress of Fluid Mechanics, Dhaka, Bangladesh* (2010), CD-ROM

謝辞

本研究の遂行にあたり，終始一貫してご指導頂きました鬼頭修己教授に謹んで感謝の意を表します．また，研究をまとめる際に，数多くの貴重な教示を頂きました辻俊博教授，森西洋平教授に謹んで感謝の意を表します．

本研究を行うにあたって，研究の進め方や取り組む姿勢など大変貴重な教示を頂きました，中林功一氏（愛知工科大学名誉教授），内藤悦郎氏（愛知工科大学名誉教授），伊藤基之教授（愛知工科大学），橋本孝明教授（愛知工科大学自動車短期大学）に謹んで感謝の意を表します．

本研究に必要な解析プログラムの作成に多大なるご協力を頂きました村田幸藏氏（愛知工科大学）ならびに実験装置の製作および実験に協力頂いた中林研究室，伊藤研究室の歴代の学部生の皆様に感謝いたします．

また，精神面での健康をご支援いただきました内藤康宏氏に心よりお礼申し上げます．

最後になりましたが，大学院博士後期課程までの長きに渡り勉学の機会を与えて頂いた両親と家族に感謝します．