

平成 21 年 6 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560185
 研究課題名（和文） プッシュプル局排装置における噴流の乱流構造と完全局排設計に関する研究
 研究課題名（英文） Turbulence Structure of Push-Pull-Jet on Perfect Push-Pull Local Ventilation system and its design
 研究代表者
 中林 功一（NAKABAYASHI KOICHI）
 愛知工科大学・工学部・教授
 研究者番号：90024231

研究成果の概要：プッシュプル流れの平均速度分布および乱れ強度の下流方向への変化や、プッシュプル噴流の構造の概略を流体力学的立場から明らかにした。また、漏れ限界流量比や噴流最大速度の下流方向への変化の様子や噴流速度分布は、吹き出し位置と吸い込み位置間の距離の変化によりどのような影響を受けるか、そして、有害ガスであるブルームがプッシュプル噴流にどのように下流方向へ運ばれてゆくのかについて実験的に明らかにした。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：プッシュプル局排装置、噴流、乱流

1. 研究開始当初の背景

研究代表者の中林は、過去、多年に渡り労働省愛知労働基準からの依頼により粉塵対策委員として、愛知県下の各工場の作業現場を観察してきた。塵肺患者発生原因の第1は溶接工場のヒュームであると言われているが、作業環境の悪さから言えば、鋳物工場環境も不良で、改善しなければならない。このような工場ではマスクの着用が義務付けられているが、このマスク着用は作業者にとって息苦しく、作業能率の低下の原因でもあるため、

マスクを着用しない作業者もいる。経営者側も最近では作業環境の改善の必要性を認め始めたが十分とは言えない。また、地球環境の保全からも、有害ガスを外気に放出するのではなく、その局所でこのような有毒ガスを完全に捕集し除去する必要がある。特に金属ヒュームは比重が大きいので、フードによる吸引では完全に除去することができない。そこでプッシュプル方式による局排方式が必要になるが、これに関する詳細な研究が国内外とも見あたらない。

2. 研究の目的

本研究は、有毒ガスをその発生している局所において完全に捕集するための新しいプッシュプル方式を開発することを目的とする。従来のプッシュプル方式の設計方法に関しては、林太郎氏が発明した流量比法が知られているが、これは質量保存関係を表す連続の式のみを考慮した設計方法であり、筆者らが目指しているような完全局排の基礎を解明するための流体力学的特性を明らかにしようとする研究が見当たらない。プッシュプル方式における噴流の特色は、吹き出しによる2次元噴流とポテンシャル流として扱うことが可能な吸い込みフード流れとが組み合わさって生じるところにある。静止空气中に噴出する噴流は運動量が一定の流れであるのに対し、プッシュプルでは吸い込みを伴うため、噴流の運動量が下流方向に増大する。また、有毒ガスのヒュームはブルームとしての上昇気流であるので、浮力噴流として持っている運動量も考慮した設計方法を新たに開発しなければならない。

そこでプッシュプル局排装置の吹き出し口から噴出する2次元乱流噴流の速度の主流方向（X方向）及び縦方向成分（Y方向）の平均量と変動速度成分をそれぞれ熱線風速計で測定する。そして、X、Y方向の各平均速度分布や半値幅、乱れの実効値分布などの下流方向への変化について考察する。さらに吸い込み流量を変化させたとき、上述の速度分布、乱流特性値の分布や乱流エネルギー輸送機構に与える吸い込み流量の影響について考察する。下方から上昇するブルームと噴流が衝突する時の乱流混合のメカニズムについて、X型熱線風速計による計測により考察する。

3. 研究の方法

(1) 漏れ限界流量比とプッシュプル流れの特性

図1に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部から吹き出し、周囲の空気を誘引しながら下流に向かいフード開口部に吸い込まれる。ノズルから吹き出す噴流の噴流量はバルブ1の開度により調節され、オリフィス1で質量流量が測定される。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でその質量流量を測定する。

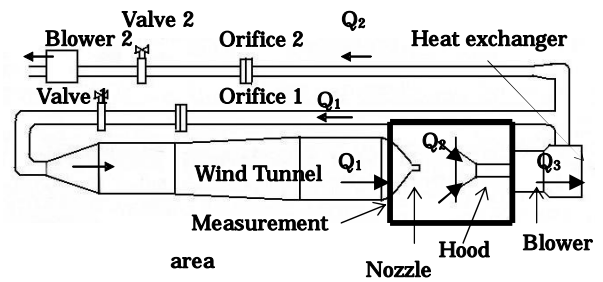


図1 実験装置の全体図

図2はこの測定部の概略図である。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。図に見られるように、フードにはフランジが設けられているが、ノズルにはフランジがなく、ノズルの外側には開口部から上流に向かうガイド板が設置されている。そして、ノズル開口部とフード開口部の間にアクリライト製の側板を設けている。

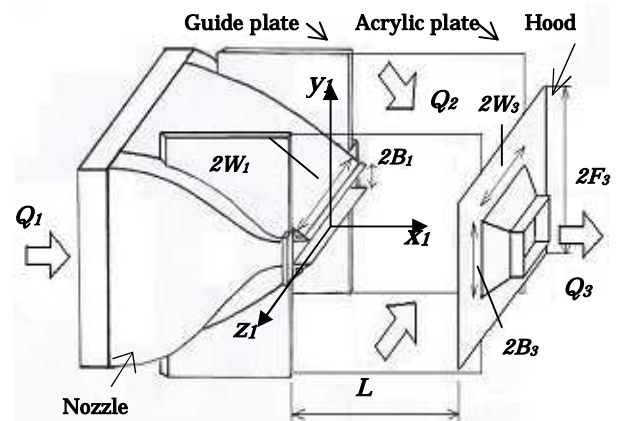


図2 測定部の概略図

ノズル開口面からフード開口面までの距離 L は 600mm ($L/2B_1=15.6$)、速度成分の測定には、熱線風速計（X型）を使用し、噴流中心軸上の x_1 - y_1 平面内の速度と乱れの x_1 方向と y_1 方向成分をそれぞれ測定した。

図3はノズルと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。ノズルから吹き出した噴流空気（プッシュプル噴流と呼ぶことにする）と噴流周辺から誘引される空気とがプッシュプル流れ（プッシュプル噴流と外部の流れの両方を指す）中で混合する。この流れ場が等温状態であるとするれば、吹き出し流量 Q_1 、誘引流量 Q_2 、吸い込み流量 Q_3 の間には次式が成立する。

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

ここで $K_L = Q_2 / Q_1$ である。

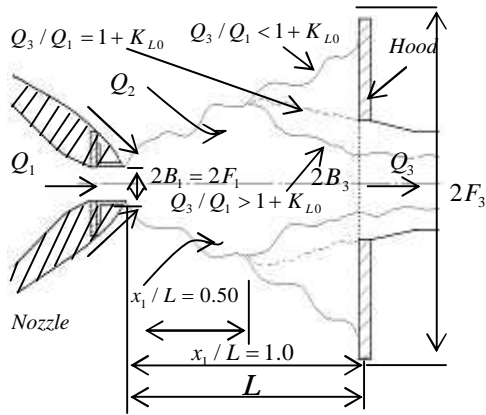


図3 プッシュプル流れ場の概念図

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を考える。 Q_3 / Q_1 がある値以下、すなわち、 $Q_3 / Q_1 < 1 + K_{Lo}$ の場合には、図3に示すように、プッシュプル噴流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。一方、 Q_3 が大きくなり $Q_3 / Q_1 > 1 + K_{Lo}$ 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。両者の限界にあたる $Q_3 / Q_1 = 1 + K_{Lo}$ の場合が存在するが、この K_{Lo} は漏れ限界流量比である。すなわち、漏れ限界流量比 K_{Lo} は、ノズルから吹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} と吹き出し流量 Q_1 との比 Q_{2c} / Q_1 として定義されている。

$K_L = Q_2 / Q_1$ と吹き出しレイノルズ数 Re_{2B1} の関係は予備実験の結果、 Re_{2B1} の変化に対し K_{Lo} がほぼ一定で、 $K_{Lo} = 0.88$ が得られた。本研究の目的は、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ことである。そのため漏れ限界流量比が $Q_{3c} / Q_1 = K_{Lo} + 1 = 1.88$ なので、本実験では Q_3 / Q_1 の値として、これよりも大きい2.24と、これより小さい1.58のそれぞれの場合について実験した。

(2) ノズルとフード間距離の影響

同排装置において、ノズル・フード間の距離は性能に大きく関係する。そこで、ノズル・フード間距離が漏れ限界流量比 K_{Lo} 、プッシュプル噴流軸速度について実験的に考察する。

K_{Lo} の測定方法は次のとおりである。 Q_1 を一定に保ちつつ、フード開口から漏れがある

状態から Q_3 を増加し、これにより Q_2 を増大させる。この時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観察し、 Q_2 の限界値 Q_{2c} を測定して求める。同様にしてノズル・フード間距離 L を変えて求めていく。

(3) プッシュプル噴流に下方からジェットが衝突する複雑乱流

図4に測定範囲の概略を示す。ノズル開口面からフード開口面までの距離 L は600mm($L/2B_1=15.6$)であり、二次元噴流中心軸から円形噴流の噴出し口中心までの鉛直距離 H_j は232mm($H_j/2B_1=6$)である。二次元噴流の噴出しレイノルズ数 $Re_{2B1}=10000$ 、円形噴流の噴出しレイノルズ数 $Re_j=2000$ 、円形ノズルの位置を $L_j/L=0.7$ とした。熱線風速計の移動には3軸のトラバース装置を使用し、 $y_1 = -20\text{mm} \sim 230\text{mm}$ の範囲で平均速度分布 \bar{u} と \bar{v} およびそれぞれの乱れ強度を測定した。

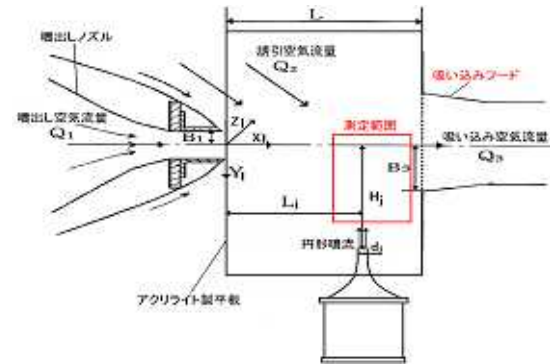


図4 測定部の詳細と測定範囲

4. 研究成果

(1) 漏れ限界流量比とプッシュプル流れの特性

主流方向速度分布

図5は無次元座標 y_1 / B_1 に対する、 x_1 方向平均速度成分 \bar{u} の無次元値 \bar{u}/U_1 の分布が、ノズル吹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。ノズル吹き出し口では分布がほぼ一定で、下流に向かって x_1 軸上の最大速度が低下し、分布が上下に広がって行く。吸い込み流量比 $Q_3 / Q_1 = 1.58$ と2.24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。 $x_1 / L < 0.50$ 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、 $x_1 / L = 0.50$ 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 の値が、 Q_3/Q_1 が大きい方は明らかに大きい。

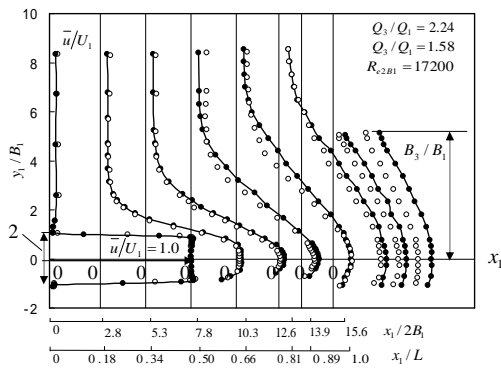


図5 噴流軸方向平均速度分布

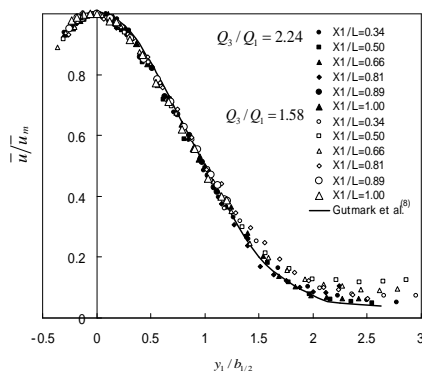


図6 噴流軸方向無次元速度分布

図6は図5の速度分布を各分布の最大速度 \bar{u} と半値幅 $b_{1/2}$ で整理し直した図である。図中の実線は静止空气中へ噴出する二次元噴流に関する Gutmark らの結果であるが、噴流中央部の $y_1/b_{1/2} < 1.0$ では Gutmark らの結果と一致している。しかし、 $y_1/b_{1/2} > 1.0$ 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。 $y_1/b_{1/2} > 1.0$ では、 $Q_3/Q_1 = 1.58$ の場合の方は \bar{u}/\bar{u}_m の値が大きいのは、図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}/\bar{u}_m の値が相対的に大きく表れるためである。

鉛直方向速度分布

図7は y_1 方向速度成分 \bar{v} の無次元値 \bar{v}/U_1 の無次元座標 y_1/B_1 に対する分布について、ノズル近傍から吸い込み口までの変化を示した図である。噴流の中心軸上では y_1 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、中心から上方に離れると、 $\bar{v} > 0$ となり噴流が外向きに広がって流れる。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、 $x_1/L = 0.18$ では Q_3/Q_1 による相違が見られないが、 x_1/L が大きいところでは相違が生じてくる。 $x_1/L < 0.50$ とでは Q_3/Q_1 に対する \bar{v} 分布の変化傾向が相違するが、一般的に、 Q_3/Q_1 が増すと \bar{v}/U_1 分布形が負の方向に移動するのが見られる。

図7は y_1 方向速度成分 \bar{v} の無次元値 \bar{v}/U_1 の無次元座標 y_1/B_1 に対する分布について、ノズル近傍から吸い込み口までの変化を示した図である。噴流の中心軸上では y_1 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、中心から上方に離れると、 $\bar{v} > 0$ となり噴流が外向きに広がって流れる。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、 $x_1/L = 0.18$ では Q_3/Q_1 による相違が見られないが、 x_1/L が大きいところでは相違が生じてくる。 $x_1/L < 0.50$ とでは Q_3/Q_1 に対する \bar{v} 分布の変化傾向が相違するが、一般的に、 Q_3/Q_1 が増すと \bar{v}/U_1 分布形が負の方向に移動するのが見られる。

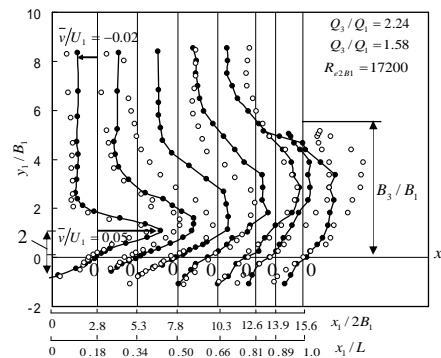


図7 鉛直方向無次元平均速度分布

噴流中心軸上速度と半値幅の下流への変化
図8(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。

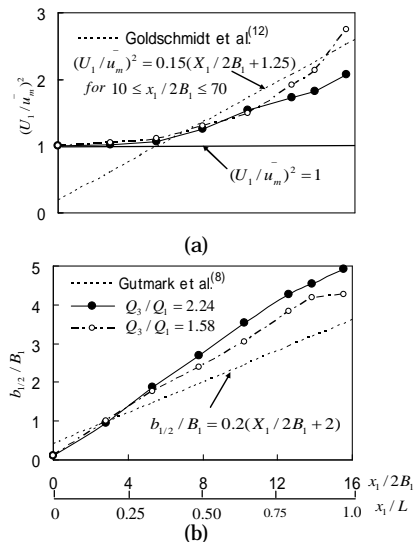


図8 最大平均速度と半値幅の下流への変化

吹き出し直後では $(U_1/\bar{u}_m)^2 = 1$ 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二次元噴流の場合よりも大きくなり、 $(U_1/\bar{u}_m)^2$ の値が Goldschmidt 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、吸い込み風速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。

一方、 $b_{1/2}/B_1$ の値は Gutmark らにより得られた静止空気中への二次元噴流の実験式より大きく、 $Q_3/Q_1 = 2.24$ の方が $Q_3/Q_1 = 1.58$ の場合より大きい。

噴流に与える吸い込みの影響

吸い込み流量比が漏れ限界流量比よりも小さい場合と、大きい場合の流れについてフード近傍の流れの相違を考察する。

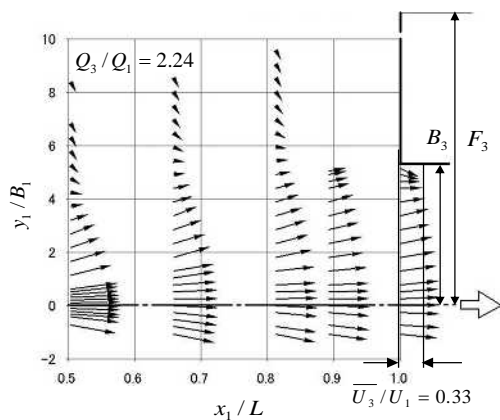


図 9(a) フード近傍における速度ベクトル図 ($R_{e2B} = 17200$)

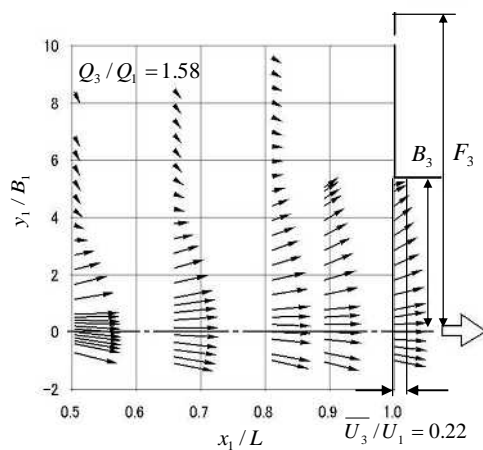


図 9(b) フード近傍における速度ベクトル図 ($R_{e2B} = 17200$)

図 9(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図である。

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、フード近傍ではプッシュプル噴流の流れ方向がフランジの存在のため外側に向って流れ、プッシュプル噴流の外縁部は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ので、フードに近づくにつれ噴流外縁部の流れ方向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。

(2) ノズルとフード間距離の影響

図 10 はノズル・フード間の無次元距離 $L/2B_1$ と漏れ限界流量比 K_{L0} との関係を示した図である。この図より $L/2B_1$ が增大すると K_{L0} の値が大きくなり、また、 F_3/B_1 が大きいほど、 K_{L0} の値が小さくなる。著者らの実験結果は林らの結果よりも K_{L0} の値が小さい。

林らは、 K_{L0} の値がノズル開口部の縦幅に対するフード開口部の縦幅の比 (B_3/B_1) に依存していないという結果を得ているので、著者らのようにノズルにフランジがない ($F_1/B_1 = 1.0$) 方が、林らのようなフランジがある ($F_1/B_1 = 80$) 場合より効率よく吸引できると考えられる。

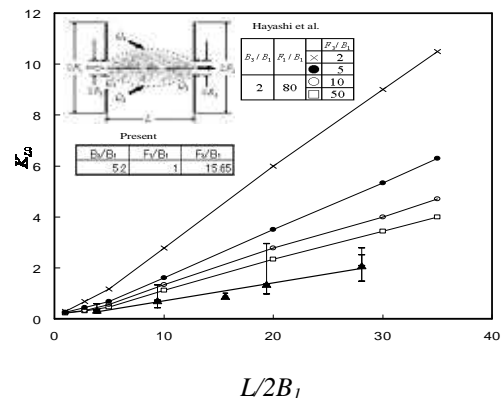


図 10 $L/2B_1$ と K_{L0} の関係

図 11 は、 $L/2B_1 = 9.4$ および 18.3 での噴流軸速度の実験結果を、横軸に $\log_{10}(x_1/B_1)$ 、縦軸に、 $\log_{10}(\bar{u}_m/U_1)$ をとって示した図である。実線は静止空気中へ噴出する平面噴流の場合で、破線はプッシュプル噴流の実験結果である。プッシュプル噴流の無次元最大速度の下流への変化傾向より、

ポテンシャルコア領域の長さおよび完全発達領域までの到達距離は、静止空中へ噴出する2次元噴流の場合より小さくなる。

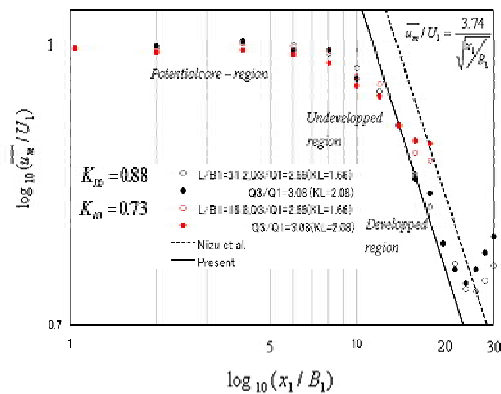


図 11 最大平均速度の変化

(3) プッシュプル噴流に下方からジェットが衝突する複雑乱流

主流方向の速度分布について、上昇円形噴流がプッシュプル2次元噴流影響を受け、プッシュプル2次元噴流の下流に傾きながら上昇し、広がっていく様子が見られる。(図12)

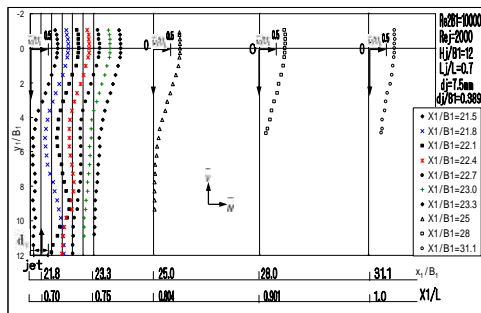


図 12 プッシュプル噴流の主流方向速度分布

鉛直方向の速度分布については、上昇円形噴流がプッシュプル2次元噴流に向かって上昇していく速度が、2次元噴流に近づくときと急激に減速の様子が見られる。(図13)

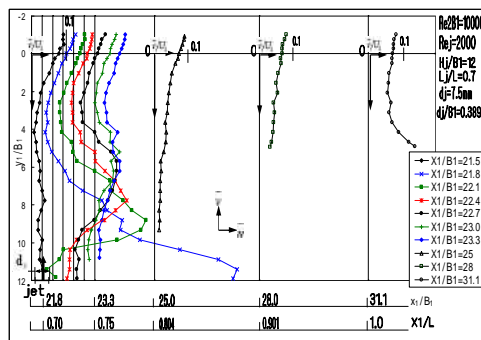


図 13 プッシュプル噴流の鉛直方向速度分布

実験成果(2)と(3)はデータの蓄積が少ないため十分な考察が行われていない。今後さらに研究を続け、実験値を用いて乱流理論に基づいた考察を行なわなければならない。

プッシュプル乱流噴流の研究に関しては、未解明な問題点が非常に多いが、特に注目すべき点はプッシュプル噴流の乱流輸送構造である。また、誘引されるプッシュプル噴流周囲の非乱流の流れ(ポテンシャル流れ)と乱流領域との関係、乱流噴流がフードに吸い込まれる場合の乱流構造の変化である。一方、プッシュプル局排方式の設計上解明しなければならない重要な点は、吹き出し空気量、誘引空気量、吸い込み空気量などの相互の関係と、吸い込みフードの設置角度やフード寸法である。そして、完全に有毒ガスを吸引することができ、しかも消費動力が最小になるようなプッシュプルの新しい設計方法を確立するところまで研究を継続する必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

中林功一、服部幸廣、プッシュプル完全局排方式に関する基礎研究(第1報 漏れ限界流量比とプッシュプル流れの特性)、日本機械学会、B編75巻753号、pp.1076 - 1083(2009)、査読有り

〔学会発表〕(計2件)

中林功一、服部幸廣：プッシュプル完全局排方式に関する基礎研究(第2報：平面噴流の乱流構造に与える吸い込みの影響)、日本機械学会流体工学部門講演会講演論文集、No. 063-1、pp.317-320(2007)

中林功一、服部幸廣：プッシュプル完全局排方式に関する基礎研究(第3報：ノズルとフード間距離の影響)、日本機械学会、日本機械学会九州支部第62期総会・講演会講演論文集

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中林 功一 (NAKABAYASHI KOICHI)

愛知工科大学・工学部・教授

研究者番号：90024231

(2) 研究分担者

服部 幸廣 (HATTORI YUKIHIRO)

愛知工科大学自動車短期大学・准教授

研究者番号：60321030