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)

中 林 功 一^{*1}, 服 部 幸 廣^{*2}

Basic Study on Perfect Push-Pull Local Ventilation (1st Report, Leakage Limit Flow Ratio and Characteristics of Push-Pull Flow)

Koichi NAKABAYASHI^{*3} and Yukihiro HATTORI

^{*3} Faculty of Engineering, Aichi University of Technology,
50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori-shi, Aichi, 443-0047 Japan

There are no investigations on the flow structure in the push-pull ventilation system except for the shutting or breaking limit flow ratio. For a push-pull local ventilation system, both a plane turbulent jet from a two-dimensional nozzle and suction flow into the hood opening, i.e. the push-pull jet flow, are utilized. However, although studies on turbulent jet structures have dealt with two-dimensional or axis symmetric jets into quiescent air, they have not investigated push-pull jet flow. In this report, we experimentally investigated the change of the mean velocity component profiles of the transient plane turbulent jet developing from a jet exit into the hood opening. The present profiles of dimensionless velocity $\bar{u}/\bar{u}_m$ agree well with those for the conventional two-dimensional jet for dimensionless perpendicular coordinate $y_1/b_{1/2} \leq 1.0$, but are greater than those for $y_1/b_{1/2} > 1.0$. The values of maximum mean velocity and half-width of the axial velocity profile along the centre-line of the jet are greater than the results for the conventional two-dimensional jet. For dimensionless coordinate in the flow direction $x_1/L \geq 0.50$, the observable effect of suction is remarkable on the axial and the lateral mean velocity components. The effects of suction rate are clarified on the distribution of the maximum values of the velocity profiles and the flow structure.

Key Words: Jet, Turbulent Flow, Flow Measurements, Velocity Distribution, Push-Pull Ventilation

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とって有害なガスは、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型局所換気装置の使用が推奨されている。しかし、現状のプッシュプル型局所換気装置は作業者全体を噴出し気流で包むように広い換気区域をとるため、大量の空気を必要とし、そのため送風機が大型で消費電力

が大きくなるという欠点がある。これを改善するためには、噴出し気流の層をできるだけ薄くして使用空気量を削減する必要があるが、そのためにはプッシュプル気流の流れ構造の詳細が明らかにされなければならない。

プッシュプル型局所換気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、噴出風量に対する誘引空気量の比の限界値を漏れ限界流量比と名づけ定義した。そして吹き出しフランジ幅、吸い込みフランジ幅、吹き出しから吸い込みまでの距離など、種々の装置形状の寸法について、漏れ限界流量比を流れの可視化法により実験的に求めた。しかし、プッシュプル噴流の流れ構造に関しては研究

* 原稿受付 2008年11月7日。

^{*1} 正員, フェロー, 愛知工科大学工学部(〒443-0047 蒲郡市西迫町馬乗50-2)。

^{*2} 正員, 愛知工科大学自動車短期大学。
E-mail: nakabaya@aut.ac.jp

していない。また、鋳込み作業時の金属ヒュームの除去⁽²⁾、メッキなどの有害ガスを遮断するための気流の流れ⁽³⁾などについての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。

プッシュプル型局所換気装置では、平面噴流とフードによる吸い込みが併用される。フードに関する研究では、新津ら⁽⁴⁾や山口ら⁽⁵⁾による二次元開口まわりの流れの研究があるが、これらは吸い込み流れが非乱流である。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、エアカーテンは吹き出しから吸い込み口までの距離がプッシュプル型局所換気装置に較べて非常に長いので、プッシュプル流れとの相違が大きい。

一方、プッシュプル噴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る。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⁾がある。しかし、これらの研究は自己保存性が成立する場合の乱流構造に関するもので、プッシュプル噴流のようにフードにおける吸い込み流れが組み合わさった乱流ではない。

本研究の目的は、エネルギー消費が少なく、有害ガスをその発生局所において完全に捕集することができる新しいプッシュプル方式を開発することである。そのためには噴流周辺の流れをも含めたプッシュプル流れの平均速度分布、乱れの実効値、乱流パルジ構造と間欠性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が、本報はこの研究の第一歩として、プッシュプル流れの基本的な流れ構造について明らかにする。そのために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、プッシュプル噴流の速度分布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に影響するのかについて実験的に考察する。

おもな記号

Q_i : 空気流量 (20°C, 標準大気圧) m^3/s
 ($i=1\sim3$) 添字1はノズル, 2は誘引, 3はフードを示す。
 Q_{2c} : 漏れ限界流量 m^3/s
 K_{L0} : 漏れ限界流量比 $= Q_{2c} / Q_1$
 U_1 : ノズル出口代表流速 m/s
 $\bar{U}_3$: フード開口断面平均流速 m/s
 (x_i, y_i, z_i) : (噴流軸方向, 鉛直方向, スパン方向),
 ノズル開口部の中心に原点を置く座標系
 $x_3 = L - x_1$: フード開口部の中心から上流へ向かう座標
 $2W_i$: 開口部の横幅 mm

$2B_i$: 開口部の縦幅 mm

$2F_i$: 開口面の縦幅 mm

($i=1,3$) 添字1はノズル, 添字3はフードを示す。

L : ノズル開口面からフード開口面までの距離 mm

$\bar{u}$: x_1 方向速度成分 m/s

$\bar{v}$: y_1 方向速度成分 m/s

$\bar{u}_m$: x_1 方向速度分布の最大値 m/s

$b_{1/2}$: x_1 方向速度分布の半値幅 mm

Re_{2B1} : 吹き出しレイノルズ数 $= 2B_1 U_1 / \nu$

2. 実験装置および実験方法

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。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室内温度まで冷却してプッシュプル流れの速度測定部が等温場となるようにした。

Fig. 1 Experimental apparatus.

Fig. 2 Schematic diagram of measurement area.

図4に $K_L = Q_2/Q_1$ と吹き出しレイノルズ数 R_{e2B1} の関係を示す。まず、 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_{sc} を測定し、 K_{L0} の値を求めた。次に、 Q_1 の値を変化させ、同様にして K_{L0} の値を求めた。その結果が図中にプロットされている。パラツキがあるものの、 R_{e2B1} の変化に対し K_{L0} がほぼ一定で、 $K_{L0}=0.88$ が得られた。林らが同様の方法で $K_{L0}=1.26$ を得ているが、著者らの値が林らの値より小さい。これは林らの実験が流れの遮断を調べるための装置なので、ノズル開口部にフランジが設けられているのに対し、本実験装置にはフランジがない。そのため噴流外周部に生じる気流状態に相違が現われたものと考えられる。

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 $Q_{sc}/Q_1 = K_{L0} + 1 = 1.88$ 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。

4. 平均速度の考察

4.1 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。

Fig. 5 Variation of axial mean velocity profiles.

$x_1/L < 0.50$ 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。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その差がむしろ大きくなっている。

Fig. 6 Axial mean velocity profile.

図6は図5の速度分布を各分布の最大速度 $\bar{u}_m$ と半値幅 b_{12} 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⁽⁸⁾ であるが、噴流中央部の $y_1/b_{12} < 1.0$ では Gutmark らの結果と一致している。しかし、 $y_1/b_{12} > 1.0$ 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である。 $y_1/b_{12} > 1.0$ 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_{12} の値が小さく、噴流外周部における y_1/b_{12} 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。また、後述の図10(b)に見られるように、噴流の流線がより外側に向かうためであると考えられる。

4.2 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 $x_1/L \geq 0.50$ 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 $\bar{v}/U_1$ 分布形が負の方向へ移動するのが見られる.

Fig. 7 Variation of lateral mean velocity profiles.

Fig. 8 Lateral mean velocity profiles.

図8(a)~(d)は, 流量比の影響が $\bar{u}/\bar{u}_m$ に現れるの位置 x_1/L について, 横軸に $y_1/b_{1/2}$, 縦軸に $\bar{v}/\bar{u}_m$ 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, 分布形状が同じである. しかし, プッシュプル流れの場合は Q_3/Q_1 の値が大きい場合, 吸い込み口に近づくにつれ, $\bar{v}/\bar{u}_m$ 分布形は負の方向へ移動する. このように, $\bar{v}$ の分布が静止空気中に噴出する噴流の場合と著しく相違する.

4.3 噴流中心軸上速度と半値幅の下流への変化

図9(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.

Fig. 9 Variation of maximum mean velocities and half-widths along the centre line of the jet.

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⁽¹²⁾ 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. しかし, $Q_3/Q_1=1.58$ の場合には次節で述べるように, 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二次元噴

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_{12}/B_1 の値は Gutmark ら⁽⁸⁾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。

4.4 噴流に与える吸い込みの影響 次に吸い込み流量比が図4に示した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10(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

Fig. 10(a) Velocity vector diagram in the field near the hood, $Re_{2B1}=17200$

Fig. 10(b) Velocity vector diagram in the field near the hood, $Re_{2B1}=17200$

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かって流れ, 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見れるのである。

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11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 $\bar{U}_3$ はフード開口面上の吸い込み速度の平均値である。山口ら⁽⁵⁾はこれに関して, 図12(a)(b)に示すようなフランジタイプとフレアタイプの二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12のように取っているのので, フランジタイプの方がフレア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 Silverman の経験式⁽¹¹⁾ ($K=3.7$) とよく一致している。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, 著者らの実験で採用したフードが, 図12(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タイプの中間に位置する。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。

次に, 静止空気中への二次元噴流の場合と比較する。Gutmark ら⁽⁸⁾の結果によれば, $x_1/2B_1 \geq 10$ の領域 ($x_3/2B_3 \leq 1.07$ の領域) に対して次式

$$(U_1/\bar{u}_m)^2 = 0.179(x_1/2B_1)$$

が与えられているので, 図12(c)に示す座標 x_3 を用いて式(3)のように変形する。

$$\bar{u}_m/\bar{U}_3 = \{0.179(L-x_3)/2B_1\}^{-1/2} U_1/\bar{U}_3 \quad (3)$$

図11中に式(3)を示す。 Q_3/Q_1 の値が大きい場合, プッシュプル流れの軸中心流速が吸い込みの影響を受け, 二次元噴流の場合よりも増大する。しかし, 外部への漏れ

が発生する Q_3/Q_1 の値の小さい場合には、図10(b)に示したように、流線が外部に対して凹面の曲がりを示し、噴流中心軸上では遠心力による圧力の増大により、最大速度が吸い込み口近傍では減少する傾向が見られる。漏れ限界流量比よりも大きな吸い込み流量比の時は、噴流出口で持っていたプッシュプル噴流の運動量が吸い込み口のごく近傍になると増大する。いずれにしても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、有害ガスを完全にフードへ吸引することができる。

Fig. 11 Variation of maximum mean velocities in the field near the hood.

Fig. 12 Schematic diagram of the hood.

5. 結 言

この研究の目的はプッシュプル完全局排方式を確立するため、流れの基本的特性を明らかにすることである。そこでまず、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。本報では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二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 $K_{LF}=0.88$ 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、 $x_1/L < 0.5$ ではフードによる吸い込みの影響が現れない。そして無次元速度 $\bar{u}/\bar{u}_m$ の分布は、 $y_1/b_{1/2} < 1.0$ ではガウス分布に一致するが、 $y_1/b_{1/2} > 1.0$ では吸込みが弱い場合にはガウス分布より $\bar{u}/\bar{u}_m$ の値が大きくなる。
- (3) 噴流中心軸に垂直な方向の速度成分 $\bar{v}$ は、静止空气中へ噴出する二次元噴流の分布と著しく相違する。
- (4) 噴流中心軸上の速度成分 $\bar{u}$ の最大値 $\bar{u}_m$ とこの分布の半値幅 $b_{1/2}$ は、プッシュプル噴流では静止空气中へ噴出する二次元噴流の場合より大きい。
- (5) 有害ガスをフードに吸引させる効果に関して、プッシュプル噴流のフード開口部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有効性を明らかにした。

謝 辞

本研究に対して平成16,17年度の愛知工科大学グループ研究費及び平成17,18年度の科学研究補助金基盤C(一般)が与えられた。ここに記して謝意を表する。また、本研究に対し御意見を頂いた名古屋工業大学機械工学科鬼頭修己教授に感謝する。

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 Wygnanski, 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) Silverman, L., *J. Ind. Hyg. Tox.*, 24(1942), pp. 267-276.
- (12) 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.
- (13) 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.
- (14) Nakabayashi Koichi, Yukihiro Hattori, Basic study on perfect push-pull ventilation systems (2nd report, An influence of suction on turbulence structure of plane jet, *JSME Fluids Engineering Conference 2007*, (2007), CD-ROM.