プッシュプル完全局排方式に関する基礎研究* (第3報 流れ特性に及ぼすノズル・フード間距離の影響)

服部 幸廣^{*1}, 中林 功一^{*2}
鬼頭 修己^{*3}, 伊藤 基之^{*4}

Basic Study on Perfect Push-Pull Local Ventilation (3rd Report, Influence of the Distance between Nozzle and Hood on Flow Characteristics of Push-Pull Flow)

Yukihiro HATTORI^{*1}, Koichi NAKABAYASHI,
Osami KITOH and Motoyuki ITO

^{*1} Department of Automotive Engineering, Aichi University of Technology Junior College, 50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori-shi, Aichi, 443-0047 Japan

In the first report, we investigated the characteristics of mean velocity such as the changes in mean velocity component profiles, and half-widths ($b_{1/2}$) of the mean velocity profile in the downstream direction. In our second report, we investigated turbulence characteristics such as turbulence intensity, Reynolds shear stress, and intermittency of turbulence. We carried out all experiments thus far under the condition that the distance between the nozzle and hood is constant. In this third report, we have experimentally investigated the above flow characteristics of Push-Pull flow under the condition that the distance between nozzle and hood (L) is variable. Then we operated the Push-Pull local ventilation systems at each leakage-limit flow ratio with three different distances between the nozzle and hood, respectively. As the result, the existence of a region where the flow of air accelerates in the downstream direction became clear near the hood as the distance L became longer. In this region, an increase rate of half-widths in the downstream direction near the hood became smaller. At the same time, the flow of air and the velocity of entrainment near the hood rapidly increased. Also, turbulence intensity in the axial direction becomes smaller in the downstream direction as the distance L becomes greater. The value approaches that of the intensity in the lateral direction. Reynolds shear stress decreases in the downstream direction.

Key Words : Turbulence Intensity, Reynolds Shear Stress, Push-Pull Ventilation

1. 緒 言

現在その使用が推奨されているプッシュプル局排装置⁽¹⁾は、開口断面のアスペクト比が1~2程度の大型のノズルから噴き出す大量の気流で、作業領域全体を包み込むようにして、溶接などの作業で発生する有害ガスを下流へと運び、フードで吸引・除去する構造である。このため、大型の送風機を使用しており、エネルギー消費が大きい。著者らは、このようなプッシュプル局排装置にかわる、極力少ない噴き出し気流で有害ガスをその発生の局所で完全に除去、排出できる新しいプッシュプル局排装置を作製した。本装置は、噴き出しノズル開口断面のアスペクト比を10程度の形状にすることで、噴き出し気流の縦幅を薄くし、使用空気量が少ない2次元噴流を噴き出し気流に用いたものである。このように、エネルギー消費が少ない新しいプッシュプル局排装置の設計指針

* 原稿受付 2010年11月5日

^{*1} 正員, 愛知工科大学自動車短期大学 (〒443-0047 愛知県蒲郡市西迫町馬乗 50-2)

^{*2} 正員

^{*3} 正員, 名古屋工業大学

^{*4} 正員, 愛知工科大学

E-mail: hattori@aut.ac.jp

を得るために、第1報⁽²⁾では、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2報⁽³⁾では、それに関連した設計上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、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について明らかにした。これらの報告は、ノズル・フード間の距離が一定の場合における吸い込みの影響を実験的に考察したものであるが、ノズル・フード間距離は装置の設計上重要な要素である。なぜなら、ノズル・フード間距離が変われば、漏れ限界流量比が変化し、ノズル・フード間の流れ特性が相違するからである。本報では、ノズル・フード間の無次元距離 ($L/2B_i$) を、以下の三つ場合に設定した。(i) ポテンシャルコア領域より少し長い程度の短い場合 ($L/2B_i=8$)、(ii) 未発達領域であるこれまでと同程度の場合 ($L/2B_i=17$)、(iii) 2次元噴流において完全発達領域に達するまで長くした場合 ($L/2B_i=26.9$)。そして、それぞれの漏れ限界流量比で (最小エネルギーで) 運転したときのノズル・フード間の流れ特性への無次元ノズル・フード間距離の影響を明らかにする。

主な記号

- $2B_i$: 開口部の縦幅 mm
 $b_{1/2}$: x_i 方向速度分布の半値幅 mm
 $2F_i$: 開口面の縦幅 mm
 L : ノズル開口面からフード開口面までの距離 mm
 Q : ノズル・フード間の噴流中心縦断面単位幅あたりの流量 m^3/s
 Q_j : 縦断面単位幅あたりの空気流量 (20°C, 標準大気圧) m^3/s
 Q_{2C} : 縦断面単位幅あたりの漏れ限界流量 m^3/s
 Re_{2Bl} : 噴き出しレイノルズ数 $= 2B_i U_i / \nu$
 U_i : ノズル出口流速 m/s
 $\bar{u}$: x_i 方向平均速度成分 m/s
 $\bar{u}_m$: 噴流中心軸上の x_i 方向平均速度 m/s
 u' : x_i 方向瞬時変動速度成分 m/s
 $\bar{v}$: y_i 方向平均速度成分 m/s
 v' : y_i 方向瞬時変動速度成分 m/s
 $2W_i$: 開口部の横幅 mm
 (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_g : フード中心を原点とし、ノズル中心に向かう座標

添え字

- i : 1 はノズル, 3 はフードを表す
 j : 1 は噴き出し, 2 は噴流外部からの誘引, 3 は吸い込みを表す

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。第1報および第2報で用いた実験装置は、ノズル・フード間距離を変化させることができない構造であるため、ノズル・フード間距離を変化させることができる実験装置を新たに作製した。実験装置の主な諸寸法は旧装置と比べてスケールを0.6倍とした相似形となるようにした。風洞内で整流された気流が、高さ $2B_1=23\text{mm}$ 、幅 $2W_1=240\text{mm}$ の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、高さ $2B_3=120\text{mm}$ 、幅 $2W_3=240\text{mm}$ のフード開口に吸い込まれる。ノズルからの噴き出しとフードによる吸い込みには、2台のプロアを用い、バルブ1と2の開度により Q_1 および Q_2 の流量を調節し、オリフィス1と2でそれぞれの質量流量を測定する。図2は図1中のノズル・フード間の速度測定部の概略図である。また、図3は速度

測定部中央 ($z_I = 0\text{mm}$) における縦断面図である。図2および図3で示すようにノズルの先端には短い平行部があるがフランジはなく、フード開口面には木製のフランジが設けられている。座標 (x_I, y_I, z_I) の原点はノズル開口面中心にとり、 x_I 軸はそこからフード開口面中心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。座標 x_3 は、フード開口中央を原点とし、そこからノズル中央に向かう座標である。なお、図3に示すように、フード開口部のフランジは高さ $2F_3 = 360\text{mm}$ で、約 100mm の厚みがある。その下部にはスリットが設けてあり、フード開口付近 ($x_3 = 6, 30, 60\text{mm}$) の測定時に熱線プローブが下方から挿入できる構造になっている。測定部の左右両側には、ノズル開口部の上流からフード開口部の間に木製のガイド板とアクリル製の側板を設けている⁽⁴⁾。 $x_3 = 90, 120\text{mm}$ ($x_3/B_3 = 1.5, 2.0$) の測定時は、熱線プローブを開放されている左右の側板間の下方から挿入する。表1に示す無次元距離 x_3/B_3 の位置に、3軸のトラバース装置を用いてX型熱線プローブを移動し、熱線風速計で速度成分を測定した。

Fig. 1 Experimental apparatus.

Fig. 2 Measurement part of experimental apparatus.

Fig. 3 Vertical cross sectional figure of measurement part of experimental apparatus.

Table1 Locations of measurement.

$L / 2B_1$	x_3/B_3													
8	0.1	0.5	1	1.5	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-
17	0.1	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	-	-	-	-	-
26.9	0.1	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	7	8	9	10	

3. 漏れ限界流量比と速度分布測定

図4はノズルとフード間のプッシュプル流れの模式図である．ここに、噴き出し流量 Q_1 ，誘引流量中のフードに入る流量 Q_2 ，吸い込み流量 Q_3 の間には次式が成立する．ここで $K_L = Q_2/Q_1$ である．

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

漏れ限界流量比 K_{L0} は、ノズルから噴き出した空気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⁽¹⁾．

Fig. 4 Schematic representation of push-pull flow field.

林ら⁽¹⁾はこの漏れ限界流量比を求めるために、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} を求める次式を導いた⁽¹⁾．

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

一方、本実験でのフードにおける気流の漏れの有無の判別は、フード開口中央部の上端と下端の少し上流で発煙管の煙を噴流中に導入し、そ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て行った．

図5にノズル・フード間距離と漏れ限界流量比 K_{L0} の測定結果を示す．図中の実線は林らの K_{L0} を求める上式に本実験装置の諸寸法を代入して求めた漏れ限界流量比である．測定され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、林らの用いた噴き出しノズルのアスペクト比が2.5、本実験装の場合が約10.4と異なるためであると考えられる．実験条件として、噴き出しレイノルズ数 Re_{2B1} を3800とした．無次元ノズル・フード間距離 $(L/2B_1)$ は、第1報、第2報では $L/2B_1 = 15.7$ = 一定としたが、本実験においては、 $L/2B_1 = 8$ ($L=184\text{mm}$)、 $L/2B_1 = 17$ ($L=391\text{mm}$)、 $L/2B_1 = 26.9$ ($L=618\text{mm}$) とした．ノズルからの噴き出し流量 Q_1 に対するフードによる吸い込み流量 Q_3 の比 Q_3/Q_1 は、それぞれのノズル・フード間距離における漏れ限界流量比に対応する値とした．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 (最小エネルギー) で運転して流れ特性を考察するが、図5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

$(L/2B_1 = 8)$, $1.4 (L/2B_1 = 17)$, $2.0 (L/2B_1 = 26.9)$ 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.

Fig. 5 Relationship between $L/2B_1$ and K_{LD} .

4. 平均速度分布

4・1 噴流中心軸上速度と半値幅の下流への変化

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変化をそれぞれ図 6(a)(b)に示す. 図 6(a)中の太い実線は Goldschmidt ら⁽⁵⁾ の, 図 6(b)中の太い実線は Miller ら⁽⁶⁾ の 2 次元噴流での結果である. 図 6(a) において $L/2B_1 = 17$ ($L = 391\text{mm}$), $L/2B_1 = 26.9$ ($L = 618\text{mm}$) の場合, 中心軸上速度が 2 次元噴流の場合と同じように下流に向かって減速した後, 強い吸い込みの影響でフードに向かう加速領域が見られる. しかし, $L/2B_1 = 8$ ($L = 184\text{mm}$) の場合は, 下流に向かって減速した後に加速する領域が見られない. これは, 漏れ限界流量比が小さく吸い込みが弱いためである. また, 図 6(b)に示すようにノズル・フード間無次元距離が $L/2B_1 = 17$ および 26.9 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 7(a)で示した加速領域と対応している. 半値幅の値が 2 次元噴流の結果と比較して全体に大きくなっているが, 原因は現在のところ不明である.

Fig. 6 Variation of maximum mean velocity and half-width in the downstream direction.

4・2 フード近傍の平均速度分布

図7は異なるノズル・フード間距離のフード近傍（ $x_3/B_3=0.5\sim 2.0$ ）における平均速度分布 $\bar{u}/U_1$ を示したものである。噴流は周囲の空気を誘引しながら下流に向かって発達していくため、ノズル・フード間距離が長いほど、中心速度が小さく外周部の速度が大きい分布形となる。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8は、 $x_3/B_3=0.5, 1.5$ について縦軸に $\bar{u}/\bar{u}_m$ をとって整理しなおしたものである。 $L/2B_1=8, 17$ の場合、下流に向かって分布が広がって行くが、 $L/2B_1=26.9$ 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で噴流の広がりが抑制されているためであると考えられる。

Fig. 7 Variation of axial mean velocity profile near the hood.

Fig. 8 Variation of axial mean velocity profile near the hood.

5. 流量の変化および変化率

図9は各測定断面 x_3/B_3 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スパン方向の単位幅あたりの流量を 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⁽⁷⁾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、噴流のエントレイン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。 $L/2B_1=17, 26.9$ 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 $L/2B_f=8$ ではこのような傾向が見られない。これは $L/2B_f=8$ での K_{L0} の値が小さく吸い込み量が少ないためである。 $L/2B_f=17, 26.9$ 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流量 Q を求めているためである。

図10は、図9で示した流量比 Q/Q_1 の下流への変化を多項式近似した関数の導関数を求めて、 Q/Q_1 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の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次元噴流では $x_1/2B_1 \leq 30$ で値がほぼ一定である⁽⁷⁾。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、 $L/2B_f=8$ では2次元噴流と同様であるが、 $L/2B_f=17, 26.9$ の場合、強い吸い込みの影響により流れが加速され、フード近傍で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 $L/2B_f=17$ (391mm) 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。

Fig. 9 Variation of flow ratio Q/Q_1 in the downstream section. Fig. 10 Change rate of flow ratio Q/Q_1 in the downstream section.

6. 乱れ強度

6・1 フード近傍の乱れ強度

図11 (a) ~ (c) はフード近傍の x_3/B_3 が異なる位置における主流方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_m$ 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⁽⁶⁾の結果である。実験結果はいずれも2次元噴流の結果と比較して値が小さい。これは、流れが未発達であることと、吸い込みの影響によるものであると考えられる。フードから上流 $x_3/B_3=1.5$ の位置では L によらず分布がほぼ同じであるが、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 L が長くなるほど噴流中心部で乱れ強度が小さくなる。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⁽³⁾。

図12 (a) ~ (c) は、フード近傍における鉛直方向の乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/u_m$ 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⁽⁶⁾の結果である。実験結果はいずれも2次元噴流の結果と比較して値が小さい。これは、 $\sqrt{u'^2}/u_m$ と同様、流れが未発達であることと、吸い込みの影響によるものであると考えられる。フードから上流 $x_3/B_3=1.5$ の位置では、 $L/2B_f=8$ 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、 $L/2B_f=17$ と 26.9 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。

6・2 噴流中心軸上の乱れ強度

図13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⁽⁷⁾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、主流方向および鉛直方向でそれぞれおよそ0.26, 0.20の一定値となる⁽⁶⁾。プッシュプル流れの場合、噴き出した気流は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 $x_1/2B_1 \cong 8$ および $x_1/2B_1 \cong 12$ より下流において、吸い込みの影響で逆に乱れ強度が減少していく。特に、 $\sqrt{u'^2}/u_m$ がフード近傍の加速領域で大きく減少し、その値が $\sqrt{v'^2}/u_m$ に近づく。 $L/2B_1=8$ 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。

Fig. 11 Effect of nozzle-hood distance on the turbulence intensity profile $\sqrt{u'^2}/u_m$ at three different axial positions.

Fig. 12 Effect of nozzle-hood distance on the turbulence intensity profile $\sqrt{v'^2}/u_m$ at three different axial positions.

Fig. 13 variations of axial and lateral turbulence intensity along the center axis of the flow.

7. レイノルズせん断応力

図14(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⁽⁶⁾の完全発達した2次元噴流の結果である。実験結果はいずれも2次元噴流の結果と比較して値が小さい。これは、流れが未発達であることと、吸い込みの影響によるものであると考えられる。 $x_3/B_3=1.5$ では、 L によらず分布形が同じである(図14(a))。しかし、下流に向かって L による相違が大きくなっていく。すなわち L が長くなるほど $-\overline{u'v'}/u_m^2$ の値が小さくなる(図14(b),(c))。図15は、図14(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、 $-\overline{u'v'}/u_m^2$ 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。 x_1 方向のレイノルズせん断応力 $-\overline{u'v'}$ の生成項 P_{12} は、式(1)で与えられる。

$$P_{12} = \overline{u'^2} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_1} + \overline{v'^2} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y_1} \quad (1)$$

また、式(1)を $\overline{u_m}$ と B_3 で無次元化すると式(2)となる。

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

式(2)において、第1項は、実験結果より、 $\bar{v}/\overline{u_m}$ の下流への変化が極めて小さいので第2項に比べて極めて小さく、第2項が支配的であると考えられる。図16に $x_3/B_3=0.5$ における異なる L での式(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ことがわかる。

Fig. 14 Reynolds shear stress profiles.

Fig. 15 Reynolds shear stress profiles.

Fig. 16 Production terms.

8. 結 論

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 $L/2B_f$ 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 $L/2B_f \geq 17$ 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 $L/2B_f \geq 17$ では、フード近傍の加速領域でエンタレイメント速度が増大する。
- (3) 無次元ノズル・フード間距離が $L/2B_f \geq 17$ では、フード近傍の加速領域では、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 $-\overline{uv}/u_m^2$ が下流に向かって減少する。これは、 $-\overline{uv}$ の生成項の計算結果の大小関係とよく対応している。

謝 辞

本研究に対して平成 20,21,22 年度の愛知工科大学グループ研究費及び平成 19,20 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。

文 献

- (1) 林太郎, 柴田優, 桜井寛, 金原清之, “プッシュプルフードの特性とその設計に関する研究”, 空気調和・衛生工学会論文集, No. 9, (1979), pp. 29-37.
- (2) 中林功一, 服部幸廣, “プッシュプル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)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 75, No. 753 (2009), pp. 1076-1083.
- (3) 服部幸廣, 中林功一, 鬼頭修己, 伊藤基之, “プッシュプル局排方式に関する基礎研究 (第2報: プッシュプル流れの乱れ特性)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 76, No. 772 (2010), pp. 2002-2010.
- (4) 中林功一, 服部幸廣, 内藤悦郎, 渡部吉規, “一様な二次元噴流の生成”, 愛知工科大学紀要, Vol. 4, (2007), pp. 23-26.
- (5) Goldschmidt, V.W., Young M.F., Ott E.S., “Turbulent convective velocities (broadband and wavenumber dependent) in a plane jet”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 105, (1981), pp. 327-345.
- (6) Gutmark, E. and Wygnanski, I. “The planar turbulent jet”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 73, part3, (1976), pp. 465-495.
- (7) 新津靖, 加藤孝夫, “エア・カーテンの性能および設計に関する研究 (第1報) 等温平面自由噴流の特性”, 衛生工業協会誌, Vol. 32, No. 10, (1958), pp. 587-595.
- (8) 新津靖, 加藤孝夫, “エア・カーテンの性能および設計に関する研究 (第2報) エア・ドアの試作研究”, 衛生工業協会誌, Vol. 34, No. 32, (1960), pp. 78-82.
- (9) Bradbury, L.J.S., “The Structure of a self-preserving turbulent plane jet”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 23, part1, (1965), pp. 31-64.
- (10) Heskestad, G., “Hot-Wire Measurements in a Plane Turbulent Jet”, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 32, No. 4, (1965), pp. 721-734.