プッシュプル完全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)

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

(2nd Report, Turbulence Characteristics of Push-Pull Flow)

Yukihiro HATTORI^{*5}, Koichi NAKABAYASHI,
Osami KITOH and Motoyuki ITO

^{*5} Department of Automobile Engineering, Aichi University of Technology Junior College,
50-2 Manori, Nishihasama-cho, Gamagori-shi, Aichi, 443-0047 Japan

In the first report, we had investigated the characteristics such as the changes of the mean velocity component profiles, half-widths ($b_{1/2}$) of the mean velocity profile in the downstream direction of the Push-Pull flow. In this report, we have experimentally investigated the characteristics of the turbulence intensity, Reynolds shear stress, and intermittency of turbulence. Turbulence intensity $\sqrt{u'^2}/U_1$ in the axial direction is not affected by the flow rate ratio Q_3/Q_1 (Q_1 is jet flow rate from nozzle and Q_3 is suction flow rate produced by the hood.). At the same time, turbulence intensity $\sqrt{v'^2}/U_1$ in the lateral direction becomes greater as the hood is approached and the flow rate becomes larger. These results are in accord with the values of production term for $\overline{u'^2}$ and $\overline{v'^2}$. Although the variation of $\sqrt{u'^2}/\bar{u}_m$ with respect to dimensionless coordinate $y_1/b_{1/2}$ becomes similar with that for completely developed two-dimensional jet, the value decreases in the downstream direction as the flow rate ratio becomes larger for Push-Pull flow. But the flow rate ratio do not affect $\sqrt{v'^2}/U_1$. Reynolds shear stress becomes smaller as the flow rate ratio becomes larger near the hood. Dimensionless distance $y_1/b_{1/2}$, from the centre axis of the flow to the point where intermittency factor γ becomes constant value ($\gamma=0.3$ or 0.5), becomes narrower as the flow rate ratio becomes larger near the hood. At the same time, the distance becomes smaller than that for completely developed two-dimensional jet.

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

1. 緒 言

現在用いられているプッシュプル局排装置は、噴き出し気流とフードによる吸い込み流れを組み合わせ、ノズル・フード間に空気の流れを発生させる構造であり、これを、溶接などの作業領域全体を包み込むように設置し、ノズル・フード間を流れる大量の気流で、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換気装置である。従来のプッシュプル局排装置

は、このように作業領域全体を、大量の噴き出し気流で包み込み、フードで吸引する構造であるため、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試作した。本装置は、従来型の噴き出しノズル開口断面のアスペクト比が1~2程度である形状に対して、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。本研究の目的は、このような、噴き出し気流の層が薄い2次元噴流を用いたプッシュプル完全局排方式の設計指針を得るため、プッシュプル流れの流れ構造を明らかにすることである。このようなプッシュプル流れに関連した研究に、エ

* 原稿受付 2010年5月25日。

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

^{*2} 正員, 永年会員, 愛知工科大学工学部。

^{*3} 正員, 名古屋工業大学工学部。

^{*4} 正員, 愛知工科大学工学部。

E-mail: hattori@aut.ac.jp

NII-Electronic Library Service

Table 1 Locations of measurement.

x_i mm	0	110	206	302	396	487 (496)	535 (544)	600 (586)
$x_i/2B_1$	0	2.8	5.3	7.8	10.3	12.6 (12.8)	13.9 (14.1)	15.5 (15.2)
x_i/L	0	0.18	0.34	0.50	0.66	0.81 (0.83)	0.89 (0.91)	1.00 (0.98)

3. 漏れ限界流量比と速度分布測定

図3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。ノズルから噴き出した噴流空気と噴流周辺から誘引される空気とがプッシュプル流れ中で混合しながら下流に向かい、フードに吸い込まれる。ここに、噴き出し流量 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。ここで $K_L = Q_2/Q_1$ である。

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

Q_1 を一定に保ち、 Q_3 を増加させていくと、 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3に示すように、プッシュプル噴流の一部がフードに吸い込まれず漏れが生じる。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。両者の限界にあたる $Q_3/Q_1 = 1 + K_{L0}$ の場合における K_{L0} が漏れ限界流量比である⁽⁵⁾。すなわち、漏れ限界流量比は、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。

Fig. 3 Schematic representation of push-pull flow field.

実験条件として、噴き出しレイノルズ数 Re_{2B1} を 10700 および 17200 とし、ノズルからの噴き出し流量 Q_1 とフードに

よる吸い込み流量 Q_3 の比 Q_3/Q_1 は、2.1, 3.1 ($Re_{2B1}=10700$) および 1.58, 2.24 ($Re_{2B1}=17200$) とした。また、吸い込み口で漏れが生じるか否かの限界を表す漏れ限界流量比 Q_{2c}/Q_1 が 0.88⁽³⁾ なので、 Q_3/Q_1 の限界値は 1.88 になるので $Q_3/Q_1 = 1 + Q_{2c}/Q_1 = 1.58$ は、フードに漏れが生じている場合であり、これ以外の Q_3/Q_1 は、漏れが生じていない場合である。表 1 中の () は、噴き出しレイノルズ数 Re_{2B1} が 10700 の時の測定位置である。

4. 平均速度分布

4.1 x_i 方向平均速度分布 図 4 (a) (b) 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までどのように変化するかを示した図である。 $x_i/L \geq 0.66$ の領域では、速度分布に吸い込み流量比 Q_3/Q_1 による相違が現れる。すなわち、フード開口に近づくほど吸い込みの影響により $\bar{u}/U_1$ の値が大きくなる。

(a) $x_i/L = 0 \sim 0.50$

(b) $x_i/L = 0.66 \sim 1.00$

Fig. 4 Variations of axial mean velocity profile.

Fig. 5 Variations of maximum mean velocities.

4・2 流れの中心軸上速度と半値幅の下流への変化

図5は流れの中心軸上無次元速度 $\bar{u}_m/U_1$ の下流への変化を示した図である。図中の点線は Goldschmidt ら⁽⁶⁾の完全発達した2次元噴流の結果である。プッシュプル流れの無次元中心速度 $\bar{u}_m/U_1$ は、ポテンシャルコア領域より下流で減速していく。そして、フードに近づき $x_1/L \geq 0.81$ の領域では、吸い込みの影響が現れ、流量比 Q_3/Q_1 が大きくなるほど $\bar{u}_m/U_1$ が大きくなり、 $Q_3/Q_1=3.1$ の場合は加速流となっている。

Fig. 6 Half-widths in the downstream direction.

図6は、無次元半値幅 $b_{1/2}/B_1$ の下流への変化を示した図である。また、図中の点線は、Gutmark ら⁽⁷⁾の完全発達した2次元噴流の結果である。 $b_{1/2}/B_1$ に流量比 Q_3/Q_1 の影響が見られる領域は、 $x_1/L \geq 0.50$ であり、流量比が大きいほど下流に向かって値が大きくなる。これは、図3の説明で述べた、無次元中心速度 $\bar{u}_m/U_1$ に流量比の影響が表れる領域 $x_1/L \geq 0.81$ よりも上流である。すなわち、流量比が大きくなると、まず、プッシュプル流れ外縁部の速度が増大して半値幅が大きくなり、次に、これより下流で中心速度が増大することがわかる。

5. 乱れの間欠性

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が、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。乱流か非乱流かの判別には、Gutmark ら⁽⁷⁾と同様、 x_1 方向瞬時変動速度 u' の時系列信号を使用した、 u'^2 および $(\partial u'/\partial t)^2$ を用いた。

ここでは、 $(\partial u'/\partial t)^2$ の閾値を、

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

とし、 u'^2 の閾値を、 $(0.5\bar{u})^2 = 0.25\bar{u}^2$ とした。

$(\partial u'/\partial t)^2$ と u'^2 のどちらかの値が、それぞれの閾値を超えた場合を乱流とし、超えない場合を非乱流とした。判別結果は2値化し、乱流を1、非乱流を0とする。図7(a)～(d)に、乱流か非乱流かの判別過程の例 ($Re_{2B_1}=17200$, $Q_3/Q_1=2.24$, $x_1/L=0.83$, $y_1/B_1=6.5$ での判別)を示す。図7(a)は、 x_1 方向瞬時速度 u の時系列信号、図7(b)は、 $(\partial u'/\partial t)^2$ による判別結果、図7(c)は u'^2 による判別結果、図7(d)は、最終的な判別結果であり、この例では間欠係数は0.40である。

なお、閾値は、図7で示したように、 u の時系列信号と判別結果を検討して妥当な値を選んだ。

Fig. 7 An example of discrimination.

図8(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 $x_1/L = 0.81$ の $1 < y_1/b_{1/2}$ の領域で、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、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8(a)(b)において、 $Q_3/Q_1=1.58$ の場合の $x_1/L = 0.66, 0.81$ における流れの外周部で、間欠係数の値が0.2から0.25と一定の値を示しているが、これは、フードに漏れがあるため、乱流の割合が一定 ($\gamma=0.2 \sim 0.25$) の領域が上下に広がっていることを表している。

Fig. 8 Intermittency factor profiles.

Fig. 9 Dimensionless distance ($y_1/b_{1/2}$) for constant γ .

Fig. 10 Variations of axial turbulence intensity profile.

Fig. 11 Variations of axial relative turbulence intensity profile.
($x_1/L = 0.66 \sim 1.00$)

図9は、この結果の中の $Re_{2BI}=17200, x_1/L=0.66, x_1=0.81$ に関する結果を、横軸に x_1/L 、縦軸に間欠係数が一定値 ($\gamma=0.3, 0.5$) をとるとき、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、間欠係数が一定の値をとる $y_1/b_{1/2}$ が下流に向かって狭くなり、流量比が大きい方がより狭くなっていることがわかる。また、完全発達した2次元噴流の値より小さくなっている。

6. 乱れ強度分布

6・1 x_1 方向乱れ強度 図10(a)(b)は y_1/B_1 に対する、 x_1 方向乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/U_1$ の分布が、ノズル噴き出し口からフード開口部まで変化する様子を示した図である。また、図中に示した $y_1=B_3$ 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_1/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11は無次元座標 y_1/B_1 に対する、 x_1 方向相対乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u$ の分布が、 $x_1/L=0.66$ 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。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、流量比が大きくなるほど外周部の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10(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、図4(b)で示したように、流量比が増大すると同じ x_1/L の位置での x_1 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12(a)(b)は、 x_1 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 $y_1/b_{1/2}$ に対する x_1 方向無次元乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_m$ 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⁽⁷⁾ の完全発達した2次元噴流での結果より値が小さい。そして、流量比が大きいと値が小さくなる。また、 $Re_{2BI}=10700, Q_3/Q_1=3.1$ の下流で、値が小さくなっていく。これは、図5で示したように、流量比が大きいと、 $x_1/L=0.83$ より下流で、 $\bar{u}_m/U_1$ の値が大きくなっていく。また、図10で示したように、 $\sqrt{u'^2}/U_1$ の値が、流量比の影響をほとんど受けないことから、フードの吸い込みによる $\bar{u}_m/U_1$ の増大により、フードに近づく、 $\sqrt{u'^2}/u_m$ の値が減少すると考えられる。

6・2 y_1 方向乱れ強度 図13(a)(b)は無次元座標 y_1/B_1 に対する、 y_1 方向乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/u$ の分布が、ノズル噴き出し口からフード開口部まで変化する様子を示した図である。吸い込み口である $x_1/L=1.00$ では、流量比が大きいと、外周部で乱れ強度が増大している。図14は y_1 方向相対乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/u_1$ の y_1/B_1 に対する

(a) $Re_{2BI}=10700$

(b) $Re_{2BI}=17200$

Fig. 12 Variations of axial turbulence intensity profile.

分布を、 $x_1/L=0.66 \sim 1.00$ で示した図である。図6で示した x_1 方向の相対乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u$ のような流量比による相違が見られない。

図15(a)(b)は、 x_1 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 $y_1/b_{1/2}$ に対する y_1 方向無次元乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/u_m$ の分布を示した図である。図中の実線は Gutmark ら⁽⁷⁾ の完全発達した2次元噴流での結果である。図12(a)(b)で示した $\sqrt{u'^2}/u_m$ と比較して、流量比の影響が小さい。

6・3 噴流中心軸上乱れ強度 図16は流れの中心軸上における、 x_1 方向および y_1 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、図中には比較のため、Gutmark ら⁽⁷⁾、Brudbury⁽⁸⁾、Heskestad⁽⁹⁾ による2次元噴流の場合の結果も示した。2次元噴流では、 x_1 方向無次元乱れ強度 $\sqrt{u'^2}/u_m$ および y_1 方向無次元乱れ強度 $\sqrt{v'^2}/u_m$ の値が完全発達領域で一定値となるが、未発達領域での下流

(a) $x_1/L = 0 \sim 0.50$ (b) $x_1/L = 0.66 \sim 1.00$

Fig. 13 Variations of lateral turbulence intensity profile.

($x_1/L = 0.66 \sim 1.00$)

Fig. 14 Variations of lateral relative turbulence intensity profile.

への発達過程が、実験装置によりかなり相違する事がわかる。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、図中に実線で示した Gutmark ら⁽⁷⁾の2次元噴流に関する結果より値が小さくなる。また、フードに近づくと、レイノルズ数が同じ場合、流量が大きいと値が小さい。これは、図12の考察で述べた要因と同様と考えられる。 $\sqrt{v^2}/u_m$ 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。

7. レイノルズせん断応力

図17(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 $\sqrt{uv^2}/u_m$ を

(a) $Re_{2B1} = 10700$ (b) $Re_{2B1} = 17200$

Fig. 15 Variations of lateral turbulence intensity profile.

Fig. 16 Variations of turbulence intensities in axial and lateral directions along the centre line of flow.

として示した図である。図中の実線は、Gutmark ら⁽⁷⁾による完全発達した2次元噴流の結果である。図16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 が大きいほど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 が大きいほど周囲からの非乱流の誘引空気量が増大するためであると考えられる。

(a) $Q_3/Q_1=1.58$ ($Re_{2B1}=17200$)

(b) $Q_3/Q_1=2.24$ ($Re_{2B1}=17200$)

Fig. 17 Reynolds shear stress profiles.

8. 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(1)、式(2)で与えられる。

$$P_{11} = -2\overline{u'^2} \frac{\partial \overline{u}}{\partial x_1} - 2\overline{u'v'} \frac{\partial \overline{u}}{\partial y_1} \quad (1)$$

Fig. 18 Production terms.

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

また、式 (1), 式 (2) を U_1 と B_1 で無次元化すると式 (3), 式 (4) となる。

$$P_{11}^* = -2 \frac{\bar{u}^2}{U_1^2} \frac{\partial (\bar{u}/U_1)}{\partial (x_1/B_1)} - 2 \frac{\bar{u}\bar{v}}{U_1^2} \frac{\partial (\bar{u}/U_1)}{\partial (y_1/B_1)} \quad (3)$$

$$P_{22}^* = -2 \frac{\bar{u}\bar{v}}{U_1^2} \frac{\partial (\bar{v}/U_1)}{\partial (x_1/B_1)} - 2 \frac{\bar{v}^2}{U_1^2} \frac{\partial (\bar{v}/U_1)}{\partial (y_1/B_1)} \quad (4)$$

図18(a)(b)は、式 (3) 右辺第1項と第2項を前述の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 $\bar{u}^2$ の乱れの生成項 P_{11}^* の第1項は、流量比が大きいと、正の値が小さい、または、負の値が大きいことがわかる。第2項は逆に流量比が大きいと正の値が大きい。したがって、第1項と第2項を合計すると、 P_{11}^* は、流量比の影響が小さく、また、図18(b)の分布形からわかるように、 $y_1/B_1 = 3.6$ 付近に最大値を持つ分布になる。この P_{11}^* の分布は、図10(b)で示した吸い込み口近傍での乱れ強度分布が、流量比の影響をほとんど受けていないこと、最大値が $y_1/B_1 = 3.6$ 付近にある実験結果とよく対応している。

図18(c)(d)は、式 (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、 $\bar{v}^2$ の生成項 P_{22}^* の第1項は、流量比が大きいと正の値が大きく、第2項も、流量比が大きいと正の値が大きい、または、負の値が小さい。したがって、 P_{22}^* は流量比の影響を受け、流量比が大きい場合、乱れの生成が大きい分布になる。この P_{22}^* の分布は、図13(b)で示した吸い込み口での $\sqrt{\bar{v}^2}/U_1$ の分布が、流量比が大きい場合、値が大きい実験結果とよく対応している。

9. 結 論

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) が一定値をとるまでの無次元距離 $y_1/b_{1/2}$ が小さくなる。そして、完全発達した2次元噴流の値より小さくなる。

(2) x_1 方向乱れ強度 $\sqrt{\bar{u}^2}/U_1$ 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 $\sqrt{\bar{v}^2}/U_1$ は、吸い込み口近傍で流量比が大きい場合大きくなる。これらの実験結果は、 $\bar{u}^2$ および $\bar{v}^2$ の生成項の分布とよく対応している。

(3) x_1 方向無次元乱れ強度 $\sqrt{\bar{u}^2}/u_m$ の $y_1/b_{1/2}$ に対する分布において、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、下流に向かって値が小さくなっていく。一方、 y_1 方向乱れ強度 $\sqrt{\bar{v}^2}/u_m$ については、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は、下流に行くほど流量比の影響が強くなり、 x_1 方向乱れ強度 $\sqrt{\bar{u}^2}/u_m$ は、流量比が大きい場合、値が小さくなる。また y_1 方向乱れ強度 $\sqrt{\bar{v}^2}/u_m$ 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分布は、吸い込み口で外周部の値が小さくなる。そして、流量比が大きいとより値が小さくなる。また、分布の幅 $y_1/b_{1/2}$ が狭くなる。

謝 辞

本研究に対して平成20,21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) 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.
- (2) 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.
- (3) Koichi Nakabayashi, Yukihiko Hattori, Basic Study on Perfect Local Push-pull Ventilation (1st Report, Leakage Limit Flow Ratio and Characteristics of Push-pull Flow, *JSME*, vol.75, No.753, (2009), pp.1076-1083.
- (4) Koichi Nakabayashi, Yukihiko 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.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) Gutmark, E. and Wygnanski, I., The planar turbulent jet, *J. Fluid Mech.*, vol.73, part3, (1976), pp. 465-495.
- (8) Bradbury, L.J.S., The Structure of a self-preserving turbulent plane jet, *J. Fluid Mech.*, vol.23, part1, (1965), pp. 31-64.
- (9) Heskestad, G., Hot-Wire Measurements in a Plane Turbulent Jet, *J. of Applied Mechanics*, vol.32, No.4, (1965), pp. 721-734.