中央に長方形切欠を持つ長方形ノズルから流出する乱流噴流*
(第1報, 平均速度場)藤田 重隆^{*1}, 張間 貴史^{*1}, 大坂 英雄^{*2}Turbulent Jets Issuing from Rectangular Nozzle
with a Rectangular Notch at the Midspan
(1st Report, Mean Velocity Field)Shigetaka FUJITA^{*3}, Takashi HARIMA and Hideo OSAKA^{*3} Tokuyama College of Technology, Dept. of Mechanical and Electrical Engineering,
3538 Takajo, Kume, Shunan-shi, Yamaguchi, 745-8585 Japan

The mean velocity field of turbulent jet issuing from rectangular nozzle (Aspect Ratio=12.5) with a rectangular notch at the midspan, has been investigated experimentally. Four aspect ratios of rectangular notch (NAR) were 2.5, 7.5, 12.5 and 165. The Reynolds number based on the nozzle width d and the exit mean velocity U_e , was kept constant 30 000 (NAR=2.5 and 7.5), 15 000 (NAR=12.5) and 13 000 (NAR=165), respectively. In this experiment, the variation of the potential core length and the changing rate of both the velocity and the length scales in the characteristic decay region were examined, and the present study suggested the possibility of the engineering applications. From the relationship between these results and the inward secondary flow producing both on the rectangular jet axis and the rectangular notch axis, effects of the rectangular notch on the development of the rectangular jet were clarified. Furthermore, the difference of the NAR value changes both the magnitude and the direction of the secondary flow. Finally, it is revealed that the potential core length takes the maximum value in the case of NAR=12.5, and the half velocity width b_z/d on the rectangular jet axis shows the minimum value in the case of NAR=165.

Key Words: Rectangular Jet, Rectangular Notch, Passive Control, Mean Velocity Field, Secondary Flow, Streamwise Development

1. 結 論

長方形噴流の特徴は、軸対称噴流と比べ、流体平均深さ(断面積/濡れ縁長さ)が小さいノズルから流出することから生じ、この特徴を利用するとエントレインメント率向上(混合促進)⁽¹⁾が要求される場合には有利である。ところが、長方形噴流の工学上の使用例では、複数並行噴流による洗浄や均一メッキ技術⁽²⁾、圧延機械の酸洗工程⁽³⁾およびエアーカーテン(空気シールド、換気装置)⁽⁴⁾など、むしろ噴流到達距離の伸び(拡散の遅延)が期待されている。このような技術的課題に対しては、噴流のポテンシャルコア領域(以下 PC 領域と略記)長さを伸ばすことが重要な手段となろう。これには、①ノズルアスペクト比(以下 AR と略記)の効果⁽⁵⁾を再検討した長方形噴流の利用や、

②パッシブ制御の手段としての長方形切欠噴流の利用⁽⁶⁾などがあげられる。

①に関連して、Trentacoste と Sforza⁽⁷⁾や Sforza と Stasi⁽⁸⁾は、長方形噴流の実験から流れ場を 3 分類(PC 領域、特性減衰領域(以下 CD 領域と略記)および軸対称減衰領域(以下 AD 領域と略記))している。その中で、AR の変化は PC 領域の長さの変化よりむしろ CD 領域の代表速度の減衰に著しく現れ、そのべき乗指数 n は $AR=10\sim15$ で最小値 -0.35 をとることを報告した。また、Marsters と Fotheringham⁽⁹⁾は $AR=6.44$ 以上の長方形噴流では速度分布が二次流れによる“くら形分布”を示し、CD 領域に特徴が生じることを明らかにした。これらのことから AR の変化は PC 領域の伸びのみでなく、CD 領域の減衰を緩和する手段としても利用できる可能性がある。

②に関連して、藤田らは有限長十字形噴流⁽¹⁰⁾および長方形切欠を有する二次元的噴流⁽¹¹⁾の場合、 $AR=12.5$ のとき PC 領域が最長となり、それは噴流中心向きの二次流れが最大となるためと報告している。

* 原稿受付 2005 年 10 月 3 日。

^{*1} 正員、徳山工業高等専門学校機械電気工学科(〒745-8585 周南市久米高城 3538)。^{*2} 正員、山口大学工学部(〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)。
E-mail: fujita@tokuyama.ac.jp

さは、 $u_{rms}/U_e \approx 0.5 \times 10^{-2}$ で一定であった。さらに流れ方向の測定範囲は、ノズル出口から最大でノズル幅 d の230倍下流までとした。

3. 実験結果および考察

3.1 平均速度の等値線図 本流れ場全体の変化の様子をみるために、 $NAR=2.5, 7.5, 12.5^{(10)}$ および $165^{(11)}$ の切欠噴流の場合の U/U_e の等値線図を図2, 3, 4 および 5 に示す。図中にそれぞれの NAR の場合のノズル形状をドットパターンで示しておく。 $NAR=2.5$ の切欠噴流の場合、 $x/d=2$ 断面で等値線分布はノズル形状に近い傾向を示すが、 y 軸および z 軸上のノズル端付近で、外向き角部の等値線が内側へゆがんでいる。これは、豊田らの報告⁽¹⁴⁾によると、ノズル端の外向き角部では噴流内側への渦糸の変形が生成するためと説明されている。また、 $z/d \approx \pm 1.0$ 付近では z 軸に垂直外向きの等値線の突出が存在する。これは、後述の二次流れ分布と関連して推測すると、 z 軸上では外端から内向きと噴流中心領域から外向きの両者の二次流れが存在（ $x/d=2$ 断面の結果は図示していない）し、両者がこの位置で対向し外方向きの二次流れが生じたためと考えられる。これらの二次流れは、第1種の場合⁽¹⁵⁾に相当する。 $x/d=10$ 断面ではおよそ z 軸を長軸とする楕円形となり、その z 軸上で $U/U_e \geq 1.0$ の値をもつ5つの領域（ $z/d=0, \pm 1.5$ および ± 3.5 付

近）が生じている。 $z/d \approx \pm 1.5$ 付近でみられる等値線の外方への突出は、 $x/d=2$ 断面と同じ理由による。 $x/d=40$ 断面は、長方形噴流で見られる y 軸と z 軸の半値幅の逆転⁽¹⁶⁾が生じる位置より下流であり、等値線の概形は y 方向に長軸を持つ楕円形状に変化する。さらに下流では、後述の速度および長さの尺度の結果より軸対称噴流的な等値線形状に移行する。

次に、 $NAR=7.5$ の切欠噴流の場合、 $x/d=5$ 断面では等値線はノズル外郭形状に近い十字形を示す。しかし、 y 軸および z 軸上のノズル端付近では、 $NAR=2.5$ の分布と同様、等値線は内側への変形を生じている。一方、噴流中心領域では二次流れにより $y=\pm z$ 方向への等値線の突出が見られ、有限長十字形噴流の結果⁽¹⁰⁾と同様の傾向を示す。 $x/d=20$ 断面では、等値線の幅が噴流中心向きの二次流れのため y 軸上で最も狭く（図12より半値幅が最小）なる。 $x/d=40$ 断面になると、等値線は y 軸および z 軸上に軸を持つひし形に変化しているが、まだ軸対称噴流的な分布傾向は示さない。

さらに $NAR=12.5$ の場合、 $x/d=5$ 断面で等値線の外郭形状は対称性が良好な十字形状を示すが、 $NAR=2.5$ および 7.5 の場合と同様、 y 軸および z 軸上のノズル端で、外向き角部の等値線が内側へ突出⁽¹⁴⁾している。 $x/d=30$ 断面では、 y 軸および z 軸上で噴流幅が狭く（図12から半値幅が最小）、一方 $y=\pm z$ 方向に等値線が突出した形状となり、軸長さの反転が生じ

Fig. 2 Contour plots of longitudinal mean velocity at the constant section of x/d ($NAR=2.5$)

Fig. 3 Contour plots of longitudinal mean velocity at the constant section of x/d ($NAR=7.5$)

ている。 $x/d=75$ 断面では、ほぼ軸対称噴流的な円形の等値線分布となる。最後に $NAR=165$ の場合、 $x/d=5$ 断面で等値線はノズル形状の外郭に近い分布を示すが、 z 軸上の軸端で外向き角部が内向きに変形している。 $x/d=15$ 断面では、 z 軸上で等値線の幅が $x/d=5$ 断面のそれより狭くなるが、二次元的な領域の $y/d=8$ スライス面上の噴流幅より大きい。 $x/d=30$ 断面になると、 z 方向の噴流幅が z 軸上で最も狭くなる。

3.2 代表断面上の x 方向平均速度分布 図 6, 7 および 8 は、 $NAR=0$ (長方形噴流)、 $NAR=2.5$ および 7.5 の切欠噴流について、 y 軸および z 軸上の x 方向平均速度分布の流れ方向変化を示す。また、図 9 の右半面と左半面に、 $NAR=12.5$ および 165 の切欠噴流の z 軸上の x 方向平均速度分布を再掲⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾する。なお、図中の各 x/d 断面で使用している記号は、図 6 中の記号を参照されたい。長方形噴流についてみると、 z 軸上の速度分布は $x/d=5\sim 30$ 断面で、噴流軸端付近で最大値をとるくら形分布を示し、そのピーク位置は下流に向かい二次流れ (図 10 参照) のため噴流中心方向に移動する。 $x/d \geq 40$ の断面では、噴流中心で最大値を取り、それより外方に向かい単調減少する速度分布となる。一方、 y 軸上の速度分布はすべての流れ方向断面で、噴流中心の最大値からゼロ値に単調減少する分布である。これらの速度分布の傾向は、シャープエッジノズルから流出する長方形噴流の特徴⁽⁹⁾であ

る。

次に、切欠噴流の NAR の値による影響についてみる。 z 軸上の速度分布は、すべての NAR の場合、比較的上流断面 (およそ $x/d=5\sim 15$ の範囲) で、噴流軸端付近と噴流中心領域に極大値を持つ異形のくら形分布を示す。その後 $NAR=2.5$ および 7.5 の場合、 $x/d=30$ 断面までは噴流中心 ($z/d=0$) で極小値を取り、噴流端付近で最大値をとるくら形分布を示し、 $x/d=40$ 断面以降では噴流中心で最大値をとる分布を示すようになる。一方、 $NAR=12.5$ および 165 の場合はこれらと異なり、 $x/d=20$ 断面以降では噴流端でのピークはなくなり、噴流中心で最大値をとる分布となる。この分布傾向の違いについて検討すると、後述の図 10 で示す z 軸上の二次流れ分布より、 $x/d=10$ 断面の噴流中心領域での外向きの二次流れが $NAR=2.5$ および 7.5 の場合にのみ存在するためである。この二次流れにより、噴流中心領域から外向きの平均流運動エネルギーの対流輸送⁽¹⁷⁾が生じるため、 $NAR=2.5$ および 7.5 の場合には噴流中心で極小値をとるものと考えられる。また、 $x/d=5$ 断面から 40 断面の間で、後述の図 12 で示す半値幅 b_z/d の減少に対応して、それぞれの NAR の場合速度分布の幅が減少し、同時に前述した噴流端近傍で速度の極大値をとる位置は、噴流中心向きに移動する。

一方、 y 軸上の速度分布をみると、比較的上流断面

Fig. 4 Contour plots of longitudinal mean velocity at the constant section of x/d ($NAR=12.5$)

Fig. 5 Contour plots of longitudinal mean velocity at the constant section of x/d ($NAR=165$)

Fig. 6 Streamwise variation of longitudinal mean velocity profiles on both the y and z axes ($NAR=0$)

Fig. 7 Streamwise variation of longitudinal mean velocity profiles on both the y and z axes ($NAR=2.5$)

Fig. 8 Streamwise variation of longitudinal mean velocity profiles on both the y and z axes ($NAR=7.5$)

Fig. 9 Streamwise variation of longitudinal mean velocity profiles on the z axis for both $NAR=165^{(11)}$ (left hand side) and $NAR=12.5^{(10)}$ (right hand side)

($x/d=5\sim 10$ 断面) で、 $NAR=2.5$ および 7.5 の切欠噴流の場合から形分布を示さないが、 $NAR=12.5$ (z 軸上の分布を参照) では速度分布⁽¹⁰⁾はくらの形形状を示している。この NAR の値による両者の違いは、二次流れの大きさと生成する位置により変化する。これに関連して、Marsters と Fotheringham⁽⁹⁾の長方形噴流の結果では、 $AR=6.44$ 以上でくらの形速度分布を示している。下流の断面になると、いずれの NAR の場合も速度分布は噴流中心の最大値から単調に減少する通常の分布傾向となる。

3.3 代表断面上の二次流れ速度 速度場の変化に及ぼす二次流れの影響を調べてみる。図 10 は、それぞれ $NAR=0, 2.5, 7.5, 12.5$ および 165 の場合における y 軸および z 軸上の $x/d=10, 20$ および 30 断面の二次流れ分布を示す。 $x/d=10$ 断面についてみると、 z 軸上ではすべての NAR の場合噴流中心向きの二次流れ ($W/U_e < 0$) が存在する。その値は $NAR=12.5$ の場合もっとも大きく⁽¹⁰⁾、 $NAR=0$ (長方形噴流) の場合、最も小さい。これは、図 11 で示す平均速度の尺度から評価した PC 領域の長さから直接影響するものである。なお、前述したように $z/d \leq 1$ の領域で、 $NAR=2.5$ と 7.5 の場合二次流れは外向きである。一方、 y 軸上の噴流中心領域における噴流中心向きの二次流れは、 $NAR=7.5$ および 12.5 の場合のみ存在し、 $NAR=12.5$ のとき最大である。これは、前述のくらの形速度分布を示す NAR の値と一致している。なお、 $NAR=165$ の場合のみ $V/U_e < 0$ を示す範囲が広く見られるが、平均流運動エネルギーの y 方向へのこの配は小さいため、対流輸送への寄与は小さい⁽¹⁷⁾。他の NAR の場合、二次流れの向きは外向きで、 $NAR=2.5$ の場合値が著しく大きい。

次に $x/d=20$ 断面では、 z 軸上で $NAR=0, 2.5$ およ

Fig. 10 Streamwise variation of the secondary flow velocity profiles on both the y and z axes

び 7.5 の場合に噴流中心向きの二次流れが存在し、 $NAR=12.5$ 以上ではすでに外向きに変化している。 y 軸上では、 $NAR=7.5$ の場合に $V/U_e < 0$ を示し、他の場合はすべて外向きの二次流れとなっている。さらに $x/d=30$ 断面になると、 z 軸上では依然として $NAR=2.5$ の場合のみ噴流中心向きの二次流れが存在する。 y 軸上をみると、すべての NAR の場合外向きの二次流れとなるが、 $NAR=2.5$ の場合その値が最も大きい。

以上の結果から、 NAR の値により二次流れの大きさおよび向きが変化し、しかも下流方向にも変化し続けることが分かる。これを利用して、PC 領域の長さの延伸や CD 領域の減衰の緩和を図ることが可能である。

3-4 代表尺度の変化 図 11 は、噴流中心軸上 (x 軸上) における x 方向平均速度 U_{ox}/U_e の流れ方向変化を示す。PC 領域の長さ ($U_{ox}/U_e \geq 1.0$ で流れ方向にその一定値を保つ領域と定義) は、 $NAR=0$ (長方

Fig. 11 Streamwise variation of the longitudinal mean velocity on the x axis

Fig. 12 Streamwise variation of the half velocity width (* is the same as b_z/d at $NAR=12.5$)

形噴流) の場合 $x/d=5$, 切欠噴流の NAR が 2.5, 7.5, 12.5 および 165 の場合、それぞれ $x/d=7, 15, 20$ および 15 であり、 $NAR=12.5$ の切欠噴流の場合が最も長く⁽¹⁰⁾, $NAR=0$ の場合最短である。 $NAR=12.5$ のとき、PC 領域の長さが最も延伸される理由は、前述したように上流の噴流軸および切欠軸上で噴流中心向きの二次流れが最大で、平均流運動エネルギーの対流輸送⁽¹⁷⁾が最も活発となるからである。

U_{ox}/U_e の下流への減衰傾向をみると、 $NAR=7.5$ および 12.5 の結果は、PC 領域から単調に減少して AD 領域の $(x/d)^{-1.0}$ に比例して減衰する。一方、 $NAR=2.5$ の場合、 U_{ox}/U_e は $x/d=20$ 付近で極小値、 $x/d=34$ 付近で極大値をとる特異な変化を示す。これに対し、 $NAR=0$ の結果および Sfeir⁽¹⁶⁾ の $AR=10$ の長方形噴流 (図示していない) の結果をみると、両者は PC 領域に続いて CD 領域を示すものの、途中で特異な分布傾向は示していない。この違いは、図 10 の二次流れ分布を参照すると、 $NAR=2.5$ の切欠噴流の場合、 $x/d=10$ 断面で y 軸および z 軸上とも噴流中心付近で二次流れは外向きとなっているためである。つまり、噴流中心付近で大きい値を持つ平均流運動エネルギーが y 軸および z 軸上で外向きに対流輸送されるため、 $x/d=10\sim20$ 断面で $NAR=0$ (長方形噴流) の場合より減衰割合が大きくなったと推測される。逆に $x/d=20\sim30$ 断面では、 z 軸上の噴流中心付近では内向きの二次流れが存在 (図 10 参照) するため、 U_{ox}/U_e の減衰割合が小さくなり、特異な変化過程を示したものと推測される。 $NAR=165$ の場合、およそ分布の傾向が $NAR=7.5$ の場合に近いが、 $x/d=40$ 断面以降では軸対称的減衰割合より緩やかとなる。

切欠噴流の NAR の値が長さの尺度に及ぼす影響をみるために、図 12 に z 軸 (噴流軸) および y 軸 (切欠軸) 上の半値幅 b_z および b_y の流れ方向変化を示す。まず、半値幅 b_z/d についてみると、すべての切欠噴流の場合、 $x/d=2$ 断面で $NAR=0$ (長方形噴流) と同じ値 ($b_z/d \approx 6.1$) より減少しはじめ、途中でそれぞれ b_y/d の値より小さくなり (噴流分布の長軸と短軸の長さが逆転)、一旦最小値をとる。この最小値は、前述した噴流中心向きの二次流れに起因⁽¹⁰⁾するものであり、 NAR の値が大きいほど小さく、 b_z/d の最小値は $NAR=165$ の場合に生じる。しかし、 NAR および二次流れの大きさや方向との関係は、CD 領域や AD 領域における噴流の特性を正確に把握しなければ説明はできない。 $NAR=2.5$ の場合、 b_z/d が他の NAR の場合と比べ下流の $x/d=40$ 断面で最小値をとるのは、 z 軸上の内向きの二次流れが $x/d=30$ 断面 (図 10 参照) ま

で維持するためと思われる。

一方半値幅 b_y/d をみると, $NAR=2.5, 7.5$ および 12.5 ($NAR=12.5$ の場合, b_z/d で代替) の切欠噴流の場合, $x/d=2$ 断面で個々の値をとった後, これより一度減少してそれぞれ $x/d=8, 20$ および 30 断面の異なる位置で最小値をとる。この最小値は, NAR の値が大きいほど大きい。最小値をとる位置が $NAR=12.5$ の場合に最下流となるのは, PC 領域が最も伸びることと対応するようである。さて, 最小値をとった後の $NAR=2.5$ および 7.5 の切欠噴流の b_y/d は, 軸対称噴流の増加割合 $(x/d)^{1/2}$ よりも大きい割合で急激に増加した後, 最終的に軸対称噴流の発達割合と同様となるが, $NAR=12.5$ の場合には軸対称噴流的な発達割合に直接移行する。

4. 結 論

長方形噴流 (アスペクト比 $=12.5$) にアスペクト比の異なる切欠噴流を直交させた流れ場について, NAR の値の違いが平均速度場の変化に及ぼす影響を調査し, 本実験範囲内で以下のことが明らかとなった。

(1) z 軸上では, すべての NAR の場合くら形速度分布を示し, この場合噴流中心向きの二次流れが生成する。一方, y 軸上では $NAR=2.5$ および 7.5 の場合, くら形速度分布を示さない。しかし, 噴流中心向きの二次流れは, $NAR=7.5$ および 12.5 の場合のみ存在する。

(2) $NAR=12.5$ の場合, PC 領域の長さが最長である。この場合, z 軸 (噴流軸) および y 軸 (切欠軸) 上で噴流中心向きの二次流れが最大である。一方, 長方形噴流 ($NAR=0$) の場合, PC 領域の長さが最短で, z 軸 (噴流軸) 上で噴流中心向きの二次流れは最小である。

(3) b_z/d の最小値は NAR の値が大きいほど小さく, $NAR=165$ の場合に生じる。一方, b_y/d の最小値は NAR の値が大きいほど大きく, 最小値をとる流れ方向位置は, $NAR=12.5$ のとき最下流となる。

文 献

- (1) Marsters, G. F., An Experimental Investigation of Spanwise Velocity Distribution in Jets from Rectangular Orifices, *Transactions of CSME*, Vol.5, No.4 (1978-79), pp.197-203.
- (2) Takeishi, Y. and Aoki, T., Characteristics of Gas Wiping Jet in Hot-Dip Coating Process, *Journal of the Iron and Steel Institute of Japan*, Vol.81, No.2 (1995), pp.135-140.
- (3) Cullen, C. W., Engineering a turbulent pickling line coupled to a 5-stand cold reduction mill, *Iron and Steel Engineer*, Vol.67, No.10 (1990), pp.21-27.
- (4) Fujisawa, N. et al., Interaction of Two Parallel Plane Jets of Different Velocities, *Journal of Visualization*, Vol.7, No.2 (2004), pp.135-142.
- (5) Sforza, P. M. et al., Studies on Three-Dimensional Viscous Jets, *AIAA Journal*, Vol.4, No.5 (1966), pp.800-806.
- (6) Marsters, G. F., Mean velocity and turbulence measurements in flows of cruciform jets, *Proceedings of the 5th Biennial Symposium on Turbulence*, (1978), pp.393-402.
- (7) Trentacoste, N. and Sforza, P. M., Further Experimental Results for Three-Dimensional Free Jets, *AIAA Journal*, Vol.5, No.5 (1967), pp.885-891.
- (8) Sforza, P. M. and Stasi, W., Heated three-dimensional turbulent jets, *Transaction of the ASME, Journal of Heat Transfer*, Vol.101, No.2 (1979), pp.353-358.
- (9) Marsters, G. F. and Fotheringham, J., The influence of aspect ratio on incompressible, turbulent flows from rectangular slots, *Aeronautical Quarterly*, Vol.31, No.4 (1980), pp.285-305.
- (10) Fujita, S. and Osaka, H., Three-dimensional Jets Issuing from Cruciform Nozzles having four aspect ratios (1st Report. Mean Flow Properties), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.53, No.488 (1987), pp.1142-1149.
- (11) Fujita, S. et al., Turbulent Jet Issuing from a Quasi Two-Dimensional Nozzle with a Rectangular Notch at the Midspan (Streamwise Variation of Mean Velocity Field), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.65, No.631 (1999), pp.905-911.
- (12) Quinn, W. R. and Marsters G. F., Upstream influence on turbulent jet flows from cruciform nozzles, *Aeronautical Journal*, Vol.89, No.882 (1985), pp.55-58.
- (13) Vagt, J. D., Hot-wire probes in low speed flow, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol.18, No.4 (1979), pp.271-323.
- (14) Toyoda, K. and Hussain, F., Study of vortical structures in a cross-shaped jet, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.55, No.518 (1989), pp.3205-3209.
- (15) Bradshaw, P., Turbulent Secondary Flows, *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.19, (1987), pp.53-74.
- (16) Sfeir, A. A., Investigation of Three-Dimensional Turbulent Rectangular Jets, *AIAA Journal*, Vol.17, No.10 (1979), pp.1055-1060.
- (17) Harima, T. et al., Turbulent Jet Issuing from a Quasi Two-Dimensional Nozzle with a Rectangular Notch at the Midspan (Additional Strain Rate and Production of Turbulent Kinetic Energy), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.70, No.695 (2004), pp.1717-1724.