衝突噴流熱伝達に及ぼすタブの影響*

檜和田 宗彦^{*1}, 田中 真太郎^{*2}
田中 光三^{*3}, 親川 兼勇^{*4}

Effect of Tabs On Impinging Heat Transfer

Munehiko HIWADA^{*5}, Shintarou TANAKA,
Kouzou TANAKA and Kenyu OYAKAWA^{*5} Gifu University, Dept. of Mechanical and System Engineering, Yanagido 1-1, Gifu, Gifu, 501-1193 Japan

The present work experimentally investigates the effect of vortex generators, in the form of small tabs projecting normally into the flow at the nozzle exit, on the flow and heat transfer characteristics of an axisymmetric impinging air jet at the subcritical Reynolds number range, with this comes the expectation of the large eddy structure variation and the possibility of the active control. Local heat transfer and static pressure were measured on the target plate for a round air jet issuing from a circular nozzle with rectangular tabs whose numbers and lengths changed at the constant nozzle-to-plate gap ($L/d=8$) and jet Reynolds number ($Re=34\,000$). The main results are the following: When two tabs were set at the exit of the circular nozzle, C_{pw} and Nu profiles flatten in the direction of the tab setting. In the case of three tabs, however, among both C_{pw} and Nu profiles a concentric profiles is expressed, as well as in one without the tab.

Key Words: Impinging Jet, Tab, Convective Heat Transfer

1. ま え が き

自由噴流による拡散問題については、古くから数多くの研究がある[伝熱工学資料⁽¹⁾, Abramovich⁽²⁾, Rajanatonam⁽³⁾]. 衝突噴流を用いた熱輸送現象は、岐点領域において高い熱伝達率が期待できるがゆえに、加熱、冷却、乾燥さらにはガラスの焼戻しなど広範な産業分野に利用されてきた。しかし、その伝熱特性制御としては、例えば(1)同軸二重噴流などによるノズル出口速度分布形状の変化によるもの[岡島⁽⁴⁾(1989), 社河内⁽⁵⁾(1995), Villermaux⁽⁶⁾(1998)], (2)非円形あるいは三次元ノズルを用いるもの[Sforza⁽⁷⁾(1966), Abramovich⁽⁸⁾(1982), Hussain⁽⁹⁾(1989), 中村⁽¹⁰⁾(1990), Oyakawa⁽¹¹⁾(1995), Zaman⁽¹²⁾(1996), Sezai⁽¹³⁾(1999)], (3)三次元かく乱によるもの[Bradbury⁽¹⁴⁾(1975), Samimy⁽¹⁵⁾(1993), Morongiu⁽¹⁶⁾(1994), Toyoda⁽¹⁷⁾(1994)], (4)音場付与によるもの[Raman⁽¹⁸⁾(1991), Ogawa⁽¹⁹⁾(1993),

Wicker⁽²⁰⁾(1994), Author⁽²¹⁾(1997)], (5)フラップ形アクチュエータ群[笠木⁽²²⁾(1998)]の適用など、さまざまな試みがなされてきたが、簡便で制御性の高いものは少ない。

最近, Hussainら⁽⁹⁾により非円形自由噴流の渦構造の変化, 例えば, 軸スイッチング⁽¹²⁾など特異な拡散過程の存在が報告され, 三次元噴流の可制御性が注目され始めてきている。

本研究では, 超音速ジェットなどの騒音低減と燃料の高混合で知られる脱着可能な矩形タブを渦発生体として用い, タブの幅, 長さおよびタブ枚数を変化させ, 衝突噴流における, 流れ特性および伝熱特性に及ぼすタブの影響を実験的に調べた。さらに, タブと音場の併用効果についても明らかにした。

記 号

本報で用いたおもな記号は次のとおりである。

 b : タブ幅 C_{pw} : 衝突平板壁面静圧係数 d : ノズル出口直径 h : タブ長さ L : ノズル-平板間距離 Nu : 局所ヌッセルト数

* 原稿受付 1999年9月17日。

^{*1} 正員, 岐阜大学工学部(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)。^{*2} アイシン化工(〒470-0451 愛知県西加茂郡藤岡町)。^{*3} 正員, 岐阜高専(〒501-0400 岐阜県本巣郡真正町)。^{*4} 正員, 琉球大学工学部(〒903-0213 沖縄県中頭郡)。

E-mail: hiwada@cc.gifu-u.ac.jp

n : タブ枚数
 Re : 噴流レイノルズ数 $= U_o \cdot d / \nu$
 T_u : 乱れ強さ
 U_o : ノズル出口
 u : 局所流速
 x, y, z : 座標系(図1参照)
 ν : 流体の動粘性係数

2. 実験装置および方法

図1に座標系とおもな記号を示す。タブ実験は、絞り比10の深絞り加工された円形ノズル(厚さ1 mm 一定, ノズル長さ200 mm, 出口直径 $d=50$ mm 一定)の出口側に幅 $b(=10, 15, 20$ mm)の矩形タブ(厚さ1 mmの銅板製)を円周方向に等間隔に2~4枚設置し, タブ長さ h を0~15 mm(閉そく比にして0~30%)の範囲で変化させ実験した。ノズル平板間距離 L/d は, おもにタブなしの場合に最大の岐点熱伝達率を与える $L/d=8$ とした。

計測対象の衝突平板上の壁面静圧は, 600×400 mmの亚克力板中央に挿入された直径300 mmの軟鋼円盤(直径0.5 mmの静圧孔を約100箇所, 十字状に配置)を任意の角度に回転させ, 精度0.01 mmAqの沈鐘形精密微差圧計により測定し, 壁面静圧係数 C_{pw} を計算した。伝熱実験は厚さ25 μ mのステンレスはくを通电加熱することにより熱流束($q_w=1.19$ kW/m²)一定の条件を得, 400×400 mmの加熱ステンレスはく裏面にはんだ付けされたCu-Co熱電対で局所温度を求め, ヌッセルト数 Nu を算出した。噴流レイノルズ数はノズル出口中心速度 U_o を代表速度とし, ノズル出口直径 d を代表長さとして定義し, $Re=3.4 \times 10^4$ 一定で行った。

Fig. 1 Coordinate system and main notations

3. 実験結果と考察

3.1 ノズル出口における平均速度 u/U_o と乱れ強さ T_u 分布 図2に $Re=3.4 \times 10^4$ 一定においてタブ枚数が2枚でタブ長さ h を変化させた場合のノズル出口における平均速度 u/U_o と乱れ強さ T_u の y, z 軸方向変化を示す。いずれの結果も一樣な速度分布をもつことがわかる。また, h の増加につれて, その一樣部分あるいは離せん断層位置にあたる乱れの最大値を与える位置は, タブの設置方向である z 方向に狭められ, 逆にタブ設置と直交する y 方向には広げられている。

3.2 タブ長さの影響 図3は動圧 $0.5 \times U_o^2$ で基

Fig. 2 Mean and fluctuating velocity profiles at nozzle exit

Fig. 3 Effect of tab length on C_{pw} , C'_{pw} and Nu profiles

Fig. 4 Effect of tab width on C_{pw} and Nu profiles

準化した衝突平板上の時間平均静圧 C_{pw} , 変動静圧 C'_{pw} 分布と局所ヌッセル数 Nu 分布をタブ枚数2枚の場合について代表的タブ長さにおける y, z 軸方向変化を示したものである ($Re=3.4 \times 10^4$ 一定). h の増加につれて C_{pw} の絶対値が減少すると同時にタブ設置に直交する y 軸方向に平坦化されている. また, 変動静圧も同様な傾向を示し, よどみ点近傍の $h/d=0.3$ の結果ではタブなしの結果の1割程度にまで激減している. これはタブ枚数2枚の結果が最も中心速度の減衰が大きい Bradbury らの自由噴流の結果⁽¹⁴⁾ と同じ傾向である.

また図3の最下段に示した Nu 分布も基本的には C_{pw} 分布同様, タブ設置の z 方向には, h の増加につれて単調に減少し, その絶対値も小さくなっていく. 一方, y 方向には平坦化されるのは C_{pw} と同様であるが, $h/d=0.3$ の結果は, 中心部より周辺部のほうがやや高い値をとっている.

3.3 タブ幅 b の影響 タブ枚数が2枚に対して, タブ幅 b を2種類変えた場合の C_{pw} と Nu 分布を $Re=3.4 \times 10^4$ 一定で行われた結果として図4に示す. 上・下図はそれぞれタブ設置方向 z , それに直交方向 y の結果である. 左図が C_{pw} 分布, 右図が Nu 分布となっている. また各図の左側が $b/d=0.2$, 右側が $b/d=0.3$ の結果である. タブ長さが非常に短い $h/d=0.04$ の C_{pw} 図以外は, 左右の図に有意な差異を認めることはできない. すなわち, 定性的特性変化に与えるタブ幅 b の影響は小さい.

3.4 タブ枚数 n の影響 タブ枚数が変化すると, y, z 軸が代表断面として採用できない. $n=3$ では

Fig. 5 Effect of tab number on C_{pw} and Nu profiles

30° 置きに対称条件が繰返されるので, 図5のように30° 置きに C_{pw} と Nu 分布の半径方向変化を表示した. 波線および実線はそれぞれノズル平板間距離 $L/d=8$ と $L/d=6$ についてのタブなしの結果である. タブありの結果を二つの L/d について白丸印と白三角印で示したが, いずれの場合においても, タブ枚数 $n=2$ の結果(図3および図4)とは異なり, それぞれの角度においても C_{pw} および Nu 分布およびその値にほとんど差異がない. すなわち, タブ枚数が3枚になるともはやタブの円周方向の不均一性の役割はみられず, タブなしの結果同様に同心円的变化を示すことが

 Fig. 6 Iso- C_{pw} and Iso- Nu maps for $n=2$

 Fig. 7 Iso- C_{pw} and Iso- Nu maps for $n=3$

想定される(後述の各種等値線図参照)。

3.5 等値線図 特定断面分布のみでは, 空間的な変化に関する情報を得ることができないので, 等値線図として, タブ枚数やタブ長さなどの影響を調べた。図6は, タブ枚数が2枚のときの結果を上図にタブ長さ $h/d=0.04$, 下図に $h/d=0.3$ の場合を, また左図に C_{pw} , 右図に Nu の等値線図を載せた。ノズルの中心線上の近傍では C_{pw} , Nu とともにタブ設置の直交方向に引き延ばされた分布となり, タブ長さ h の増加につれて, それらの値も減少している。また $C_{pw} < 0.05$ のいわゆる壁噴流領域においては $Nu=80$ の等値線図はほぼ円形となっており, この領域にまでタブの影響は及ばないものと想像される。

タブ枚数を3枚とした場合の結果を, 図6と同一表現で示したのが図7である。タブ長さが大きい下図の

 Fig. 8 Iso- Nu map for $n=4$

 Fig. 9 Iso- Nu maps for the same open ratio

結果においては, C_{pw} および Nu 分布ともに同心円状分布となっており, 円周方向へのタブの影響はみられなくなっている。ただ, タブなしの結果に比較して, タブ長さ h の大きいほどそれらの絶対値は, 小さくなっていく。またここでもタブ枚数が2枚の場合と同様, 壁噴流領域では $Nu=120$ あるいは 140 の等値線図はほぼ円形となっており, この領域までタブの影響は及ばないものと考えられる。

3枚以上のタブ枚数ではタブの影響は少なく, C_p , Nu とともに同心円的になると予測される。タブ枚数 $n=4$ でその予想を確認した。図8にその結果を示す。タブ枚数の影響は3枚以上ではさほど顕著ではなくなることがわかる。

以上の結果より, タブの影響はタブ枚数が最優先的

Fig. 10 Iso- C_{pw} and Iso- Nu maps in the case of tabs together with tone-excitation

因子であり、ついで、タブ長さ、タブ幅の順となるものと判断される。

また同一開口比=81% (あるいは閉そく比=19%) について、タブ枚数が異なる場合の結果を図9に示す。左図が $n=2$ 、右図が $n=3$ の結果である。ノズル中心位置近傍ではタブ枚数の影響による差異がみられるが、 $|y/d| > 3$, $|z/d| > 3$ のいわゆる壁噴流領域では、 $Nu=100$ (○印) の等値線は、 $n=2$ の結果が z 軸上で中心部にむかってわずかにへこみを示す以外は、 $n=3$ の結果との差異はほとんどなくなっている。その結果、図9に示された範囲での面積平均ヌッセルト数は、あまり変わらなかった。

著者らは、以前、音場が噴流拡散に影響を与えることを報告した⁽²¹⁾。そこでタブと音場の噴流制御についての役割を明確にするために、タブと音場を併用した実験を行った。その結果を図10に示す。励起周波数には、 C_{pw} 場に顕著な影響を与える周波数⁽²¹⁾ $f=29\text{Hz}$ を採用した。タブ設置方向から音場を付与すると、 C_{pw} 場では、 y 軸方向に平たんだった分布が音場付与方向に平たんな分布へと大きく変化するが、 Nu は値がわずかに小さくなるのみで、分布自体はほとんど変化しない。すなわち、適当な音場を付与すると圧力場は変化を受けるものの、温度場(Nu)はタブの影響が優位的に作用するようである。

これまでの結果はノズル平板間距離 $L/d=8$ に限定した結果である。しかし、 L/d が8より小さい領域では、タブからの随伴渦の流れ方向の減衰が少ない⁽¹⁴⁾

Fig. 11 Effect of L/d on Iso- Nu maps

と想定され、上記の議論は必ずしも成立しないと考えられる。そこでノズル-平板間距離 L/d の影響を調べた。 $n=3$ で2種類のタブ長さについての実験結果を図11に示す。ノズル-平板間距離の小さい $L/d=6$ では、タブの影響は C_{pw} および Nu 分布ともに残っている (C_{pw} 図略)。タブ枚数と L/d のどちらに優先性があるかについては将来的課題としたい。

4. 結 論

以上の実験結果をもとに以下の結論を得た。

(1) タブ枚数が2枚の場合、流れ場および伝熱特性はともに顕著な影響を受ける。すなわち、タブ設置方向に C_{pw} および Nu 分布ともに平たん化される。その影響はタブ長さが長いほど大きく、それらの数値は小さくなる。

(2) タブ枚数が2枚の場合、定性的変化に与えるタブ幅の影響は小さい。

(3) タブ枚数が3枚の時、タブ2枚でみられた効果はほとんどなくなり、 C_{pw} および Nu 分布ともにタブなしの結果同様、同心円の分布を示す。ただ、タブ長さが長くなるほど、両数値は小さくなる。

(4) タブ枚数が異なる条件で、タブによる閉そく率(あるいは開口率)が同一の場合、タブ枚数により、局所熱伝達率に与える影響は異なる。すなわち、タブ2枚ではタブ設置方向に分布が平たん化され、タブ3枚ではタブなしの結果同様、同心円状分布となり、タブの影響はみられないが、平均熱伝達率に大きな相違

はみられない。

(5) 2枚のタブと音場を併用する場合、静圧場には音場の影響が強く残るが、温度場には音場の影響はほとんどみられない。

本研究を行うにあたり、その一部に遠藤斉治朗記念科学技術振興財団の援助を得た。記して謝意としたい。

文 献

- (1) 日本機械学会編, 伝熱工学資料, 改訂第3版, (1975), 109, 日本機械学会.
- (2) Abramovich, G. N., *The Theory of Turbulent Jets*, (1960), 50, The MIT Press.
- (3) Rajaratnam, N., *Turbulent Jets*, (1976), 50, Elsevier Scientific Pub, Co.
- (4) 木綿隆弘・ほか4名, 機論, **60**-575, B(1994), 2348-2355.
- (5) 社河内敏彦・ほか3名, 機論, **61**-589, B(1995), 3251-3259.
- (6) Rehab, H., Villiermaux, E. and Hopfinger, E.J., *AIAA J.*, **36**-5, TN, (1998), 867-869.
- (7) Sforza, D. M., ほか2名, *AIAA J.*, **4**-5(1966), 800-806.
- (8) Abramovich, G. N., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **25**-12 (1982), 1885-1894.
- (9) Hussain, F. and Husain, H., *J. Fluid Mech.*, **208**(1989), 257-320.
- (10) 中村育雄・ほか3名, 機論, **44**-388(1978), 4197-4205.
- (11) Oyakawa, K., ほか3名, *Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Conf.*, **1**(1995), 377-384.
- (12) Zaman, K. B. M. Q., *J. Fluid Mech.*, **316**(1996), 1-27.
- (13) Sezai, I. and Mohamad, A. A., *J. Heat Transf.*, **121**(1999), 50-57.
- (14) Bradbury, L. J. S. and Khadem, A. H., *J. Fluid Mech.*, **70**-4(1975), 801-813.
- (15) Samimy, M., Zaman, K. B. M. and Reeder, M. F., *AIAA J.*, **31**-4(1993), 609-619.
- (16) Marongiu, M. J., Summer, B. and Kozak, E., *ASME*, 94-WA/EEP-18(1994), 1-7.
- (17) 豊田国昭・ほか2名, 機講論, No. 940-53(1994-8), 293-294.
- (18) Raman, G. and Rice, E. J., *AIAA J.*, **29**-7(1991), 1114-1122.
- (19) 小川信夫・ほか2名, 機論, **59**-566, B(1993), 2975-2981.
- (20) Wicker, R. B. and Eaton, J. K., *AIAA J.*, **32**-3(1994), 542-546.
- (21) Hiwada, M., ほか4名, *Proc. 2nd Int. Symp. Heat Transf. Enhancement Energy Conserv.*, (1997), 139-146.
- (22) 笠木伸英・ほか5名, 第35回伝熱シンポ講論集, (1997-5), 657-658.