

# 琉球大学学術リポジトリ

## 3次元壁面噴流による断熱壁面上の温度効果についての研究 第1報:1個の矩形噴口を持つ場合

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学工学部 公開日: 2012-03-27 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 長田, 孝志, 親川, 兼勇, Nagata, Takashi, Oyakawa, Kenyu メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/20.500.12000/24031">http://hdl.handle.net/20.500.12000/24031</a>

# 3次元壁面噴流による断熱壁面上の 温度効果についての研究

## 第1報：1個の矩形噴口を持つ場合<sup>†</sup>

長 田 孝 志\* 親 川 兼 勇\*

An Experimental Investigation of Temperature Effectiveness  
of an Adiabatic Flat Plate Covered by a Three-Dimensional  
Wall Jet Flow

1<sup>st</sup> Report: Wall Jet Flow Issuing from Single Rectangular  
Nozzle

Takashi NAGATA and Kenyu OYAKAWA

### Summary:

An investigation of the jet development on the flat plate and the temperature effectiveness on the adiabatic surface in three dimensional, incompressible, turbulent wall jets issuing from rectangular nozzles was undertaken. Experimental results of pertinent mean flow properties such as maximum velocity decay, growth of half-velocity width, growth of equi-velocity lines and temperature effectiveness are reported by changing the nozzle configuration, or the Aspect ratio of the rectangular slot, the initial velocity, and the temperature of the initial flow.

The flow fields of such jets are found to be characterized by three distinct regions in the maximum velocity decay. The flow patterns in the region far downstream agree well with other reports, velocity defects in the neighborhood of the potential core region, however, are pointed out. Distribution of the temperature effectiveness in the region far downstream is found to be arranged by a simple power law.

### 1. 結 言

噴流の工学的な用途は境界層流れのコントロールや純流体素子の面、熱伝達現象の面、粉体の微粒化、混合の面に開発され、その流れの様子、熱伝達の様子は興味あるものである。本研究は噴流の一形態として、ノズルから噴出した気流が平板に衝突する Impinging Jetの問題を扱っている。同種の研究として M.

(1) B. Glauert による2次元壁面噴流の理論解 (1956)  
(2) を契機として P. Bakke による軸対称壁面噴流, G.  
(3) E. Myers 等による二次元乱流壁面噴流の熱伝達の研  
(4) 究や, J. P. Hartnett, R. A. Seban, 西脇, 平田,  
(5) 馬淵, R. J. Goldstein, 等によって高温ガス流からの  
(6) 壁面保護の問題に関して二次元壁面噴流の応用として

† 受付：1971年9月30日

\* 琉球大学理工学部機械工学科

Film Cooling の基礎研究が進められてきた。これらは二次元噴流単独の場合や、壁面上の一樣速度場に対して接線方向、または法線方向に吹き出された二次気流の形成する断熱気膜層の性格を、吹き出し方法、吹き出し形状、角度および主流と二次気流の質量流速比を変化させることにより詳しく調べ壁面の冷却効果の分布を報告しているものである。一方円形噴口から噴出する層流および乱流自由噴流は古くから理論的にも、実験的にも明らかにされているが矩形およびその他の複雑な噴口の場合の自由噴流、ならびに壁面噴流は基礎方程式の線形化に難点があるため充分なデータがそろっていない現状であるが、P. M. Sforza<sup>(9)(10)</sup>等は矩形噴口を持つ、層流、乱流非圧縮性三次元自由噴流を基礎方程式の差分方程式化を試み、電子計算機から得られた結果と実験結果とに対して、最大速度の減衰、および噴流半値幅の成長についての一致を報告し、とくに噴流の発達領域における両者の変化は簡単な指数法則<sup>(11)</sup>で表示できることを示している。また岡本等は円形、および正方形噴口を持つ乱流自由噴流および平滑平板を噴流に平行に近づけた場合の流れの挙動をコアンダ効果の立場から調べ、噴流が平板に付着して広がる様子を報告している。

一方、E. R. G. Eckert<sup>(12)</sup>等は不連続吹出しによるFilm Cooling 効果について点熱源モデルを作り、一樣流れの主流と断熱壁面の間に形成される3次元的な気膜層内の温度分布や断熱壁面上の冷却効果 $\eta$ の分布に対して理論的考察を行い吹出し比をパラメータに採用して、両者に対して指数関数表示を与えている。

現実の問題として、この様な噴流の形態は、自動車の排気、地上テスト中のジェットエンジンの燃焼ガス排気、平面上のごみ、水滴などの付着物を吹き払う場合、加熱平面に冷たい空気を噴出して冷却する場合等に見られる。

本研究は矩形ノズルから隣接した平行平板に噴出する非圧縮性乱流壁面噴流が断熱平板上の温度効果におよぼす影響を噴口縦横比、噴口速度を変化させ、実験的に調べた結果であるが、この様な流れを主流と壁面の間に挿入した場合の冷却効果(または加熱効果)を推定する基礎資料にすることを目的にしている。

#### 記号

- A : 噴口厚み (mm)  
B : 噴口幅 (mm)

AR : 噴口縦横比 = (B/A)

Rej : 噴口レイノルズ数 = ( $u_j A / \nu$ )

T<sub>j</sub> : 噴口における気流温度 (°C)

u : 局所的な速度 (m/s)

u<sub>m</sub> : 噴流中心線 (x軸) 上における速度 (最大速度)

x : 噴口部より流れ方向への距離 (mm)

y : 壁面から垂直上方向への距離 (mm)

z : 流れ方向に対して横垂直方向への距離 (mm)

$\eta$  : 温度効果 =  $(T_w - T_\infty / T_j - T_\infty)$

#### 添字

i : 噴口部における状態を示す。

m : 最大速度の点の状態を示す。

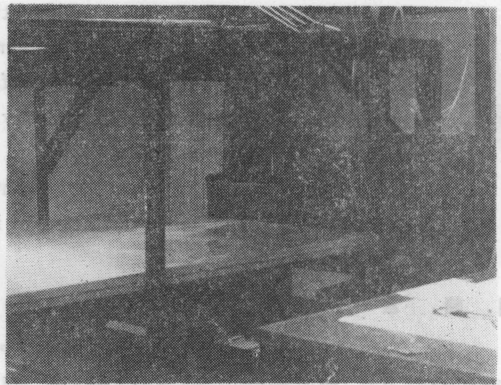
w : 壁面上における値を示す。

$\infty$  : 周囲大気状態における値を示す。

0.5 : 噴流速度の点の半値幅を示す。

## 2. 実験装置 および実験方法

実験装置概要は写真(1)に示す。遠心送風機(1700r.p.m)から出た気流は内径330mm、長さ330mmの3個の円胴部において整流され、絞り部分(120×240mm、絞り比0.34)を経て、写真に示すような平板ノズルから平行平板(1070×1500mm)に対して接線方向へ流れる、平板ノズルは絞り部出口に随



picture 1 Experimental Apparatus

時取り換えできるように設置されるが、本実験においては鋼材で製作された小型ノズル (A=3.40mm, B/A=1, 2, 3) と強化合成樹脂 (FRP) を硬化させて作ったFRPノズル (A=30.9mm, 39.2mm B/A=1.0) の両者を使用し、その噴口断面形状はFig. 1に示す。一方気流の加熱は送風機から出た直

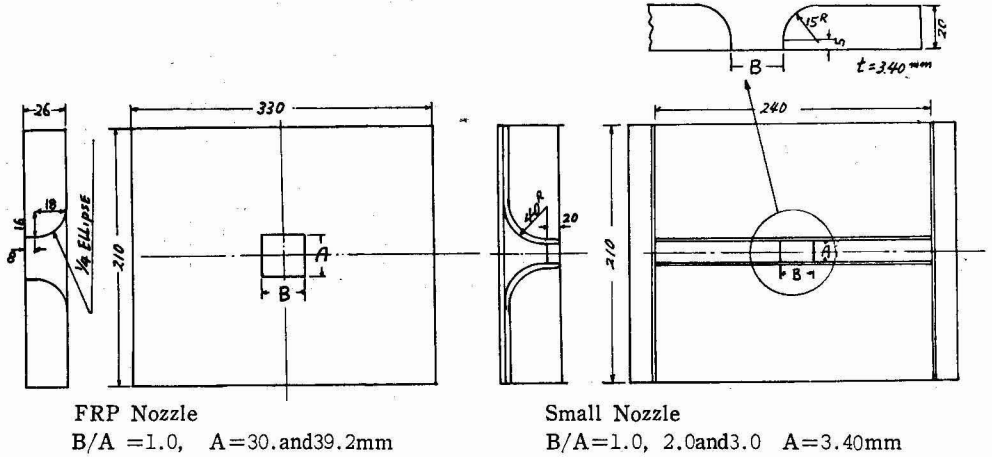


Fig. 1 Detailed drawings of nozzles

後に、240Wのニクロム線が格子状に配置され二段スイッチにより噴口において、周囲温度との差約30°Cを保持して噴出するよう設計されている。断熱平板上における表面温度は、あらかじめ検定されたCu-Con熱電対(0.32mmφ)がTable 1に示す位置に合計38個埋め込まれ、切替スイッチをへて高感度Microvolt-meterにより測定できる。

Table 1 Location of the thermocouples mounted on the adiabatic flat surface (unit : mm)

Loc. in the Z dir.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
A = 10 mm	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
B = 30 mm	0	10	20	30	40	50	60								
C = 50 mm	0	10	20	30	40	50	60	70							
D = 100 mm	0	10	20	30	40	50	60	70	80						
E = 150 mm	0	20	40	60	80	100									
F = 200 mm	0	20	40	60	80	100	120								
G = 250 mm	0	20	40	60	80	100	120								
H = 300 mm	0	20	40	60	80	100	120	140							
I = 400 mm	0	30	60	90	120	150									
J = 500 mm	0	30	60	90	120	150	180								
K = 600 mm	0	30	60	90	120	150	180	210							
L = 700 mm	0														

平板上を流れる噴流の速度測定には実験室で製作された全圧管(開口部) 3.9×0.63mm)をゲッチングン型微圧計に接続し、全圧管の移動は最小読み取り目盛1/100mmの移動装置を写真に示す鋼材で作られた枠

に設置し行った。

測定は噴口速度  $U_j = 27 \sim 55 \text{ m/s}$  で、  $x/A = 0 \sim 130$  までの範囲で行った。

実験を通じて矩形ノズルから噴出する気流温度は周囲静止気流の温度より常に高く、その意味においては壁面の加熱効果を表示することになるが、音速に対してかなり低い速度を持つ流れの場合では、周囲条件が同一である限り両者の温度が逆の場合でも全く同等な熱移動形態を持つことになり、壁面の冷却効果そのものをも表わしていることに留意したい。

### 3 流れの検定

流れの検定として噴口出口速度の矩形分布確認、および矩形噴口から噴出する三次元自由噴流の最大速度の減衰状態(床面より噴口中心位置までの距離  $y/A = 25$ ) を調べたものがFig. 2, 3である。出口部においては絞り部までの内左が影響して大気圧より幾分高い静圧を示すが、出

口速度は出口断面において測定された全圧分布で表示してある。出口における速度分布はFig. 2から明らかのように噴口の上、下面で幾分境界層が発達はしているが噴口中心軸に対して、対称形を示している。

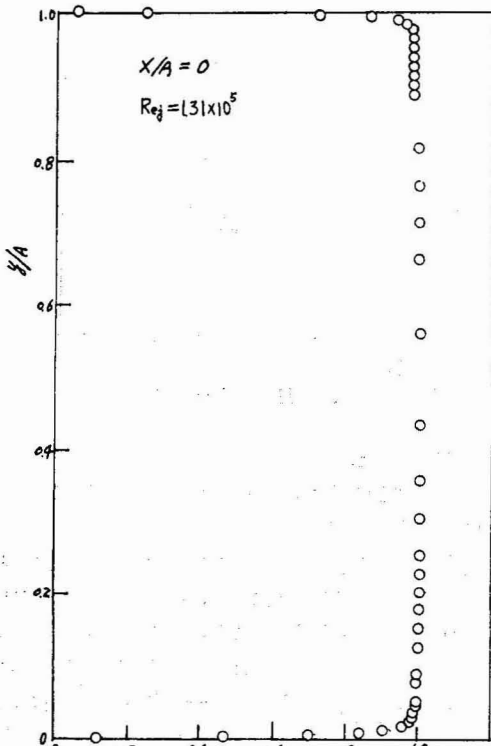


Fig. 2 Velocity profile at the nozzle exit ( $A=B=30.9$ )

最大速度の減衰状況については、 $0 \leq x/A \leq 4$  まではポテンシャルコア領域が保持され、 $4 \leq x/A \leq 15$  の領域が遷移領域で、 $x/A \leq 15$  では相似領域となり最大速度の減衰は  $(x/A)^{-1.0}$  に比例する。この結果は岡本等<sup>(1)</sup>および P.M.Sforza 等の結果とほぼ一致し

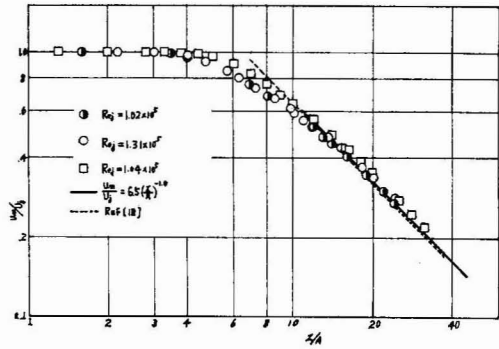


Fig. 3 Maximum velocity decay for the free jet flows

ているが、P. M. Sforza 等によって指摘されているポテンシャルコア領域におよぼす噴口縦横比の影響は本実験では調べていない。またこの減衰の様子は、<sup>(13)</sup> W. Forstall 等によって行なわれた正方形ノズルからの乱流自由噴流の減衰とも一致している。

#### 4 矩形ノズルから出る壁面噴流

##### 4-1, 速度分布

Fig. 4 は  $U_j = 55.7 \text{ m/s}$  ( $Re_j = 1.31 \times 10^5$ ) の場合の噴口中心線上における、各  $x/A$  の位置における  $y$  方向速度分布の変化の様子を示すものである。速度分布の変化の様子から解るように、ポテンシャルコア領域の存在と静止空気との混合作用の結果、 $y$  方向への噴流拡がりの激しい領域が見られる。自由噴流や二次元噴流においては矩形波速度分布で噴出した噴流は噴流自身の慣性により噴口速度がそのまま保存されるポ

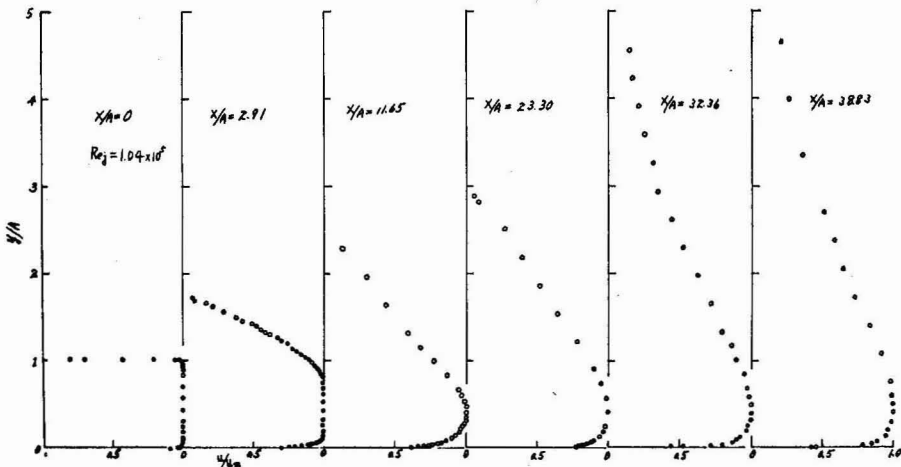


Fig. 4 velocity profiles along the center line

テンシカルコア領域と、静止空気や、固体壁面との摩擦作用により速度が減衰し始める遷移領域、さらに十分発達した相似領域が存在する。その基本的な性格は

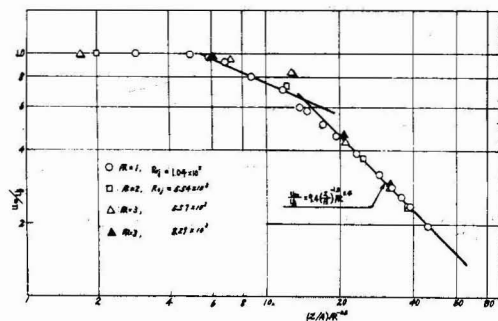


Fig. 5 Maxjimum velocity decay for the wall jet flows

3次元壁面噴流においても保持される。最大速度の減衰の様子はFig. 5に示されるように、相似領域における減衰は自由噴流同様に  $(x/A)^{-1.0}$  に比例しているがその存在する領域は幾分遅れ、また噴口縦横比によっても異なるが  $(x/A)R^{-0.4} \geq 20$  の領域である。自由噴流に比べて壁面噴流は固定壁面によって静止空気の誘引作用が阻止され、したがってポテンシカルコア領域、遷移領域が幾分長引く様子を示すと思われる。しかしながら噴口縦横比の相違によるポテンシカル領域、遷移領域の様子の違いは明らかでない。

(11)  
円形噴口を持つ場合の最大速度の減衰は  $(x/A)^{-0.78}$  に比例することを報告しているが、その測定区間は  $x/A \approx 28$  であり、直接の比較は行えない。しかし矩形ノズルをもつ壁面噴流の発達状態が十分後方では円形ノズルの場合のそれとほぼ一致してくることを考慮すれば、 $(x/A)^{-1.0}$  に漸近してくることが予想される。また誘引作用のとくに激しいポテンシカルコア領域内において、Zの各位置における $\psi$ 方向速度分布の一例として、 $x/A=2.91$ における速度分布をFig. 6に示す。Z=10mmの場合、壁面近傍では、通常の乱流境界層の速度分布の形態を呈しているが、Z=15, 20, 25mmになるにしたがい、壁面近傍における速度欠陥が顕著に表われている。これは噴流の中心軸近傍（ポテンシカル領域内）では流れは軸に平行に壁面に沿って流れる。ポテンシカルコア領域に隣接する外側の流れは、主に噴口より噴出し軸に平行に壁面に沿って流れるが、壁面近傍での速度勾配が大きく、さらにコア

ンダ効果により周りの静止流体から複雑な誘引を行うために、全圧の大きさが幾分減少し、図に示すような速度欠陥を生じている。

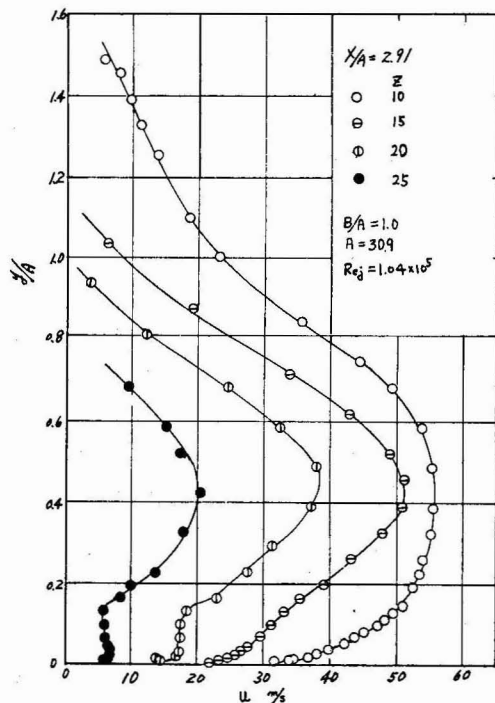


Fig. 6 Y directional velocity profiles at various points of z

#### 4-2 噴流幅の成長

最大速度の $1/2$ の大きさを示す $\psi$ 方向距離を噴流幅 $\psi_{0.5}$ として、 $x$ 方向への発達を無次元表示でFig. 7に示す。ポテンシカルコア領域から遷移領域にかけて幾分減少して再び成長し、相似領域において、ほぼ  $(x/A)^{0.6}$  に比例する。文献(14)によれば、Z方向への半値幅の成長は縦横比による相違はあるが、 $x^{1.2 \sim 1.5}$ 程度に比例していることを示し、また文献(10)

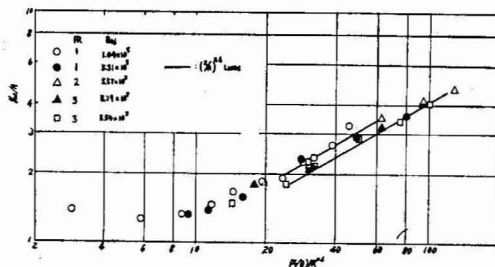


Fig. 7 Growth of the jet with in the Y direction

\* 相似領域における $x$ の各位置に対する、 $\psi$ 方向速度分布の無次元表示は文献(14)を参照、Z方向速度分布も同様である。

においてはZ方向への  $U/U_m=0.1$  の拡がりば  $x^{1.1}$  に比例することを報告している。したがって  $\psi$  方向への拡がりの遅れはZ方向への拡がりて補われていることを考えることが妥当であろう。

4-3 等速度点の分布

流れ方向 ( $\psi$  方向) の各位置における  $\theta-Z$  面内における速度分布から得られた等速度線図を Fig. 8, 9, 10, 11, に示す。流れの場は  $x-\psi$  面に対して左右対称であるから片側の等速度線図のみを示してあ

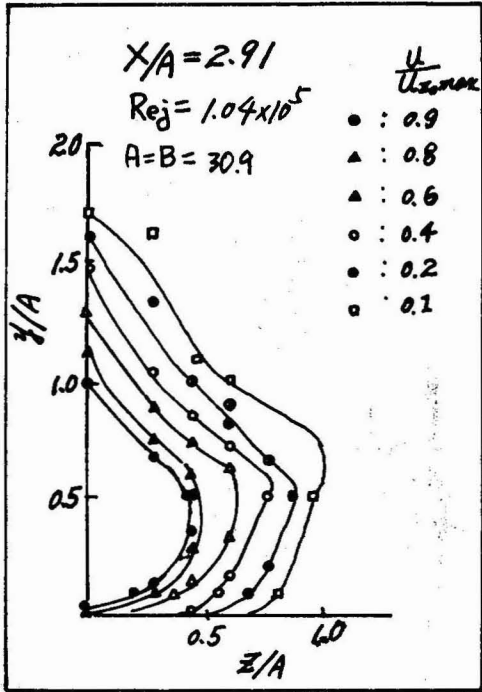


Fig. 8 Equi-velocity lines in the Y-Z plane

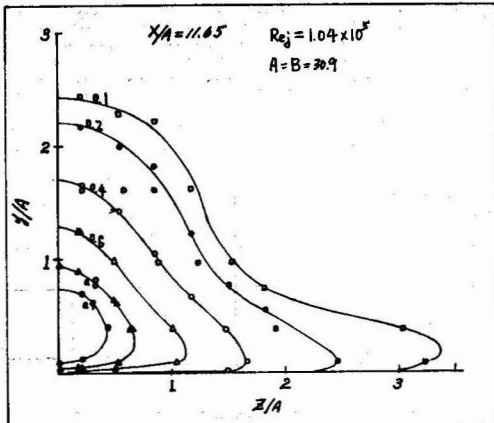


Fig. 9 Equi-velocity lines in the Y-Z plane

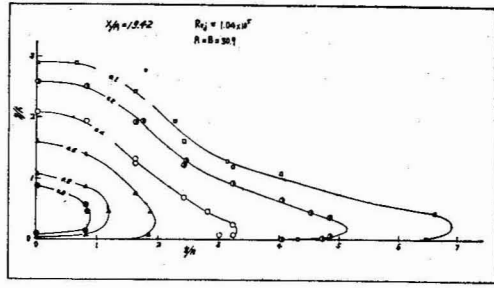


Fig. 10 Equi-velocity lines in the Y-Z plane

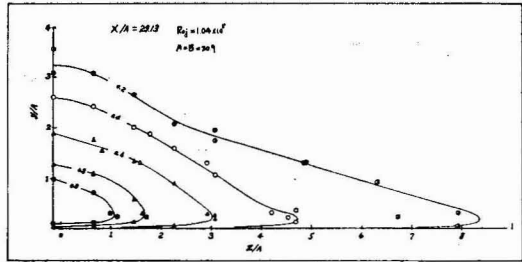


Fig. 11 Equi-velocity lines in th Y-Z plane

る。ポテンシャルコア領域においては、Z軸方向よりむしろ  $\psi$  軸方向への拡がりが著しいが、遷移領域から相似領域にかけて、壁面に沿ってZ軸方向への拡がりが急速に発達する。このことは前項における噴流半幅の成長についての妥当性を裏づけるものであり、コアンダ効果による流れの壁面付着傾向を示すものである。Fig. 12は  $u/u_m=0.2$  の等速度線図の  $x$  方向への変化を示す。文献(11)において指摘された  $x/A=3$  近傍における正方形の上の隅の周辺附近の拡がりは特に見あたらない。

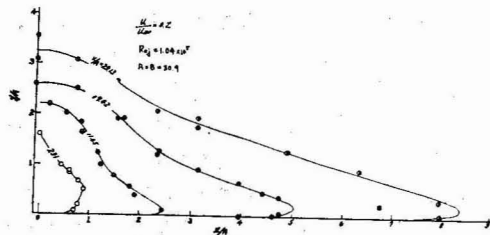


Fig. 12 Growth of the equi-velocity Lines of

$$\frac{u}{u_m} = 0.2$$

5. 断熱平板上の温度効果の分布

温度効果  $Y$  は  $(T_w - T_\infty) / (T_j - T_\infty)$  で定義され、完全に断熱された壁面上における  $Y$  の分布そのものは熱伝達計算の基礎となるものである。噴口中心線上における温度効果の減衰は Fig. 13 に示されるように縦軸に  $Y_m$ 、横軸  $x/A$  でプロットしてある。ここで  $Y_m$  は  $X$  軸上の  $Y$  であり、加熱 (また冷却) 気流による断熱壁面の局所的な加熱 (また冷却) が噴流温度 (噴口出口における) に対して相対的に如何程行われるかを示す。図示した実線は  $(x/A)^{-0.6}$  の直線

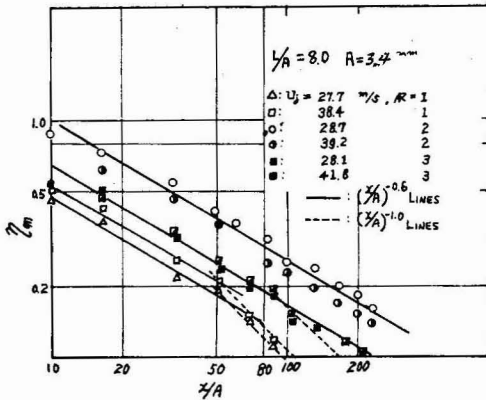


Fig.13 Decay of effectiveness on the center line を示すが、その成り立つ範囲は、噴口速度、噴口縦横比によって異なる様子を呈している。噴口縦横比  $A_1 = 1.0$  の時に見られるように  $x/A \geq 50$  の範囲で破線によって示されるように  $(x/A)^{-1.0}$  に比例する形で減衰している。このことは相似領域における最大速度の減衰と一致するものであり、流れの場と熱伝達の場の相似性の存在を暗示するものと予測される。Fig.14 は  $Z$  軸方向への加熱 (冷却) 影響部の成長を示す。加熱

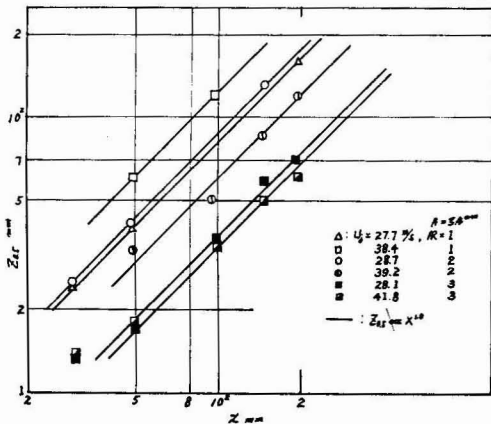


Fig.14 Growth of the heated (or cooled) width in  $z$  direction

(または冷却) 影響部の定義は対称軸 ( $x$  軸上) における  $Y$  の値の  $1/2$  の大きさを持つ  $Z$  方向距離で表わし、 $Z_{0.5}$  として図示してある。これは加熱 (または冷却) の影響を受けた領域と受けていない領域との境界が明確にできないため便宜上定義したものであり、流れの場における最大速度の半値幅に相当する。実線は  $x^{1.0}$  に比例する直線であり、その成立する節間は噴口速度噴口縦横比によって異なる。 $Y_m$  の減衰、および加熱 (または冷却) 影響部の発達は両者共に法則性を持って変化しているが、噴口縦横比、噴口速度をパラメーターに採用して統一的に記述できると推測されるが断熱平板を延長しより広い測定値を得ることによって再検討を予定している。

6. 結論

一個の矩形ノズルから出る乱流壁面噴流の挙動と、その流れの場における断熱平板上の表面温度効果の分布について実験を行い、つぎの結果を得た。

1. 矩形噴口から噴出する自由噴流はポテンシャルコア領域は  $0 \leq x/A \leq 4$ 、遷移領域は  $4 \leq x/A \leq 15$  を経て発達し、相似領域は  $x/A \geq 15$  となる。この領域における速度減衰は  $u_m/U_j = 6.5 (x/A)^{-1.0}$  で表示できる。
2. 矩形ノズルから噴出する壁面噴流の相似領域は噴口縦横比によって影響を受けるが、 $(x/A) \cdot R^{-0.4} \geq 20$  の領域で  $u_m/U_j = 9.4 (x/A)^{-1.0} R^{0.4}$  で表示できる。
3. 噴口中心線上における  $Y$  方向半値幅は噴口縦横比の影響を受けて相似領域の境界は異なるが相似領域内では  $(x/A)^{0.6}$  に比例して成長する。
4. 噴口中心線上における温度効果の減衰は相似領域の境界に関して噴口縦横比、噴口速度、噴出気流温度の影響を受けるが相似領域内では  $(x/A)^{-0.6}$  に比例して減衰する。

最後に、本研究を進めるに当たり、装置製作の面で本学部機械工学科実習室の真喜志清氏、当間進一氏に、測定およびデータ整理の面で学生安里勝男君、知念正紀君に協力していただいたことに対して厚く謝意を表す。



## 参 考 文 献

- 1) M.B. Glauert, J. of Fluid Mechanics, Vol. 1, (1956) pp625~643
- 2) P.Bakke, J. of Fluid Mechanics, Vol. 2, (1957) pp467—472
- 3) G. E. Myers, et al, Trans. ASME, Ser. C, (1963) pp209—214
- 4) J.P. Hartnett, et al, Trans. ASME, Ser. c Vol.83 (1961) pp293—306
- 5) R.A. Seban, et al, Trans. ASME, Ser. c Vol.84 (1962) pp45—54
- 6) 西脇仁一, 他 日本機械学会論文集 Vol. 27, No.180 (1961) pp1287—1290
- 7) 馬淵幾夫 日本機械学会論文集 Vol.30, No.219 (1964) pp1369—1377
- 8) R. J. Goldstein et al, Trans ASME, Ser. C (1965) pp353—361
- 9) P. M. Sforza et al, AIAA Journal, vol. 4, No.5 (1966) pp800—806
- 10) P.M.sforza et al, AIAA Journal Vol. 5, No. 5, (1967) pp885—891
- 11) 岡本哲史, 他 日本機械学会講演論文集 No.700—15 (1970) pp133—136
- 12) E. R. G. Eckert, 機械の研究, Vol.23, No. 4 (1971) pp671—674
- 13) W. Forstall, et al, J. Appl. Mech. Vol.23 (1956)
- 14) 長田孝志, 琉球技術協会誌 技術 第5号 (1970)