上壁を有する衝突噴流熱伝達の特性に関する基礎研究*

(3-スリット・ノズルの場合の数値予測)

一 宮 浩 市^{*1}, 保 坂 宣 夫^{*2}

A Fundamental Study of Heat Transfer Characteristics Due to Confined Impinging Two-Dimensional Jets (Numerical Estimation for Three Laminar Slot Jets)

Koichi ICHIMIYA and Nobuo HOSAKA

The present study describes the numerical analysis of the characteristics of the flow situation and impingement heat transfer caused by three laminar slot jets. Numerical values were obtained for the dimensionless space $H=0.5-6$, the dimensionless pitch $P=4-16$ and the Reynolds number $Re=100-1000$. It was found that a recirculating flow is generated between two nozzles and position of the maximum heat transfer depends on the flow from the next nozzle and the space between the nozzle and the impinging surface. The array of the nozzles effectively enhances the local heat transfer and keeps it at a high level.

Key Words: Thermal Engineering, Impinging Flow, Impingement Heat Transfer, Array of Nozzles, Forced Convection, Numerical Analysis

1. 緒 言

衝突噴流は、局所熱伝達の増大、除熱促進、物体の乾燥などの目的のために実用的にも幅広く応用されている。著者の一人も、高温鋼片の温度の均一化に関連して、衝突噴流による鋼片上の熱伝達⁽¹⁾、鋼片内の非定常熱伝導⁽²⁾、および乱流噴流による衝突噴流熱伝達の特性⁽³⁾などを検討してきた。これらは単一のスリット・ノズルに対する数値解析および実験的検討であった。しかし実用性を考慮した場合、必ずしも単一ノズルのみならず複数ノズルに対する検討も必要となる。従来、複数ノズルによる研究では、比較的ノズル・衝突面間距離の大きい、しかも高い出口レイノルズ数で実験が行われている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。しかし解析的に検討されたものはあまり見られない。したがって著者らは複数ノズルの最も基礎的で、数値計算の簡素化も考慮し、しかも他の複数ノズルの場合の伝熱流動状態もある程度推測可能と思われる3-スリット・ノズルに注目した。

本研究では、複数ノズルの中で3個のスリット形ノ

ズルより層流状態で噴出した流体が、平滑加熱面に衝突した場合、その局所伝熱流動がいかなる特性を示すかをレイノルズ数、ノズル・衝突面間距離、ノズルピッチを変化させて数値的に解析し、単一ノズルの場合との比較および応用的検討を行うものである。

主 な 記 号

d : ノズル幅の半分
 h_2 : ノズル・衝突面間距離
 H : ノズル・衝突面間無次元距離 $= h_2/d$
 l_2 : 流路出口までの距離
 Nu : ヌセルト数 $= \alpha \cdot 2d/\lambda$
 p : ノズル間ピッチ
 P : ノズル間無次元ピッチ $= p/d$
 Pr : プラントル数
 q : 熱流束
 Re : レイノルズ数 $= v_o \cdot 2d/\nu$
 Re_2 : 第2ノズルのレイノルズ数
 T : 温度
 T_o : ノズル出口の流体温度
 u : x 方向速度
 U : x 方向無次元速度 $= u/v_o$
 v : y 方向速度

* 平成2年3月10日 中国四国支部第28期総会講演会において講演、原稿受付 平成元年4月27日。

*¹ 正員、山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田4-3-11)。

*² 正員、(株)本田技術研究所 (〒321-33 栃木県芳賀郡芳賀町大字下高根沢4630)。

v_o : ノズル出口における流体の平均速度

V : y 方向無次元速度 $= v/v_o$

X : x 方向無次元距離 $= x/d$

Y : y 方向無次元距離 $= y/d$

α : 熱伝達係数

Θ : 無次元温度

ϕ : 流れ関数

ω : 渦度 $= \partial v/\partial x - \partial u/\partial y$

2. 問題の設定

本研究では、鋼板、フィルム等といった比較的広い物体からの除熱促進、熱伝達の改善等を対象として、その物体に複数ノズル（本研究では3-スリット・ノズル）より噴出した流体が衝突した場合、その流動状態および局所熱伝達の変化を数値的に予測するものである。また、ノズルと同じレベルに壁を設けた系が、より実用に近く、それを断熱壁として検討する。

基礎座標系を図1に示す。対象とする物体表面としては一様加熱された平滑伝熱面で同時に衝突面となる。この平滑加熱面にノズル幅 $2d$ のスリット・ノズル（二次元）より温度 T_o の流体が噴出し衝突する。3-スリット・ノズルのうち中央のノズルの中心が対称軸となり、他のノズル間のピッチは p とする。中央ノズルより、非圧縮性粘性流体が発達した層流分布で噴出し左右に流動方向を変化し、途中、他のノズルより噴出した流体と併合して流路出口に至る。解析に際しては、伝熱・流動状態は定常でふく射熱は無視する。以後、中央ノズルに隣接したノズルを第2ノズルと呼ぶことにする。

3. 基礎式と数値解法

流動伝熱状態を一般的に評価するために、流れおよびエネルギー式を無次元化し、流れについては流れ関数、渦度を導入し圧力項を消去して数値的に計算を行った。

図1 座標系

$$\psi = \frac{\phi}{dv_o}, \Omega = \frac{\omega d}{v_o}, \Theta = \frac{\lambda(T - T_o)}{q \cdot 2d} \quad \dots\dots\dots (1)$$

流れおよびエネルギー式を示すと次式となる。流れに関する無次元式

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} = -\Omega \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial Y} \frac{\partial \Omega}{\partial X} - \frac{\partial \psi}{\partial X} \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{2}{Re} \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

エネルギーに関する無次元式

$$\frac{\partial \psi}{\partial Y} \frac{\partial \Theta}{\partial X} - \frac{\partial \psi}{\partial X} \frac{\partial \Theta}{\partial Y} = \frac{2}{RePr} \left(\frac{\partial^2 \Theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial Y^2} \right) \quad \dots\dots\dots (4)$$

流れと温度に関する境界条件も無次元化すると次式となる。

・ノズル出口 ($0 \leq X \leq 1, Y = h_2/d$)

$$U=0, V=\frac{3}{2}(X^2-1), \Theta=0$$

・第2ノズル出口 ($P-1 \leq X \leq P+1, Y = h_2/d$)

$$U=0, V=\frac{3}{2}\{(X-P)^2-1\}, \Theta=0$$

・流路上壁 ($1 \leq X \leq P-1, P+1 \leq X \leq l_2/d, Y = h_2/d$)

$$U=0, V=0, \frac{\partial \Theta}{\partial Y}=0 \quad \dots\dots\dots (5)$$

・流路下壁 ($0 \leq X \leq l_2/d, Y=0$)

$$U=0, V=0, \frac{\partial \Theta}{\partial Y}=-0.5$$

・対称軸 ($X=0, 0 \leq Y \leq h_2/d$)

$$U=0, \frac{\partial V}{\partial X}=0, \frac{\partial \Theta}{\partial X}=0$$

・流路出口 ($X=l_2/d, 0 \leq Y \leq h_2/d$)

$$\frac{\partial U}{\partial X}=0, V=0, \frac{\partial}{\partial X} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial X} \right)=0$$

第2ノズルから噴出される流体により流路を流れる流量が増大する。この流れが中央ノズル（つまり上流側）方向に逆流し、上流からの流れと干渉する可能性も考えられたが、煙注入法による流れの可視化〔図3(c)参照〕で観察した結果、そのような影響は存在しなかった。また第2ノズルより下流の、流量の増大に伴う境界条件、質量の保存は考慮されている。

平滑加熱面（衝突面）上の局所ヌセルト数は次式で定義される。

$$Nu = \frac{q \cdot 2d}{\lambda(T_w - T_o)} = \frac{1}{\Theta_w} \quad \dots\dots\dots (6)$$

計算条件としては、ノズル幅の1/2を基準長さとして、 $Pr=0.7$ に対し無次元ノズルピッチ P を4.0, 6.0, 10.0, 16.0の4種類、ノズルと衝突面間無次元距離 H を0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 6.0の6種類、ノズル出口のレイノルズ数 Re を100から1000まで5種

類変化させて行った。

数値計算法としては、主として Gosman ら⁽⁶⁾の方法を用いた。従来、無次元渦度 Ω_j は壁面からの線形分布を仮定して求められていたが、本計算では、壁面を含めた3点(図2参照)の流れ関数 $\psi_j, \psi_{j-1}, \psi_{j-2}$ で表示した。すなわち、

$$\Omega_j = \frac{7\psi_j - 8\psi_{j-1} + \psi_{j-2}}{2\Delta Y^2}$$

ただし ΔY は格子点間距離である。

また壁面上の温度勾配も3点近似を行って精度を向上させた。

計算手法の概要を示すと、まず基礎式(2)、(3)、(4)を積分し、保存形に書き換え、風上差分を適用して、収束条件を満たすまで反復計算を行うものである。対称軸および壁面付近の格子点は階段状に密になっている。収束条件は各格子点の ψ, Ω, θ の逐次近似の二つの誤差の最大値が次式を満足するとした。

$$\text{Max}|\phi_p^{(n)} - \phi_p^{(n-1)}| \leq 8 \times 10^{-4}$$

なお ϕ_p は、 ψ, Ω, θ に対応する。

4. 結果および検討

4・1 流動状態 複数ノズルおよび単一ノズルによる流動状態の比較を図3に示す。単一ノズルの場合の無次元流れ関数[図3(a)]によると、ノズルより噴出した流体は加熱面に衝突した後、流れ方向を90°変える。その後、下流になるにつれ流路断面内の最大速度の位置は衝突面より離れ、ノズル付近の上壁には循環流が形成される。それに対し、複数ノズル[図3(b)]では、中央ノズルと第2ノズル間の上壁付近で、循環流が形成される。さらに第2ノズルより流体が噴出した直後では、中央ノズルより噴出した流体による衝突面付近の最高速度と第2ノズルより噴出した流体の上壁付近の最高速度の二つの最高速度が同一断面内に現れる。第2ノズルからの流体は、中央ノズルからの流体が存在するため、衝突噴流とはいえ、みかけ上 H が減少した流路への噴流になり、同じノズル・衝突面間距離に対しての単一ノズルの場合に比較して上壁

には循環流が形成されにくくなる。以上の結果を流れの可視化と対応させたのが図3(c)である。中央ノズルによる流れが、第2ノズルからの噴流の下側、すな

(a) 単一ノズル ($H=3.0, Re=500$)

(b) 複数ノズル ($P=6.0, H=3.0, Re=500$)

(c) 可視化写真 ($P=6.0, H=3.0, Re=500$)

図3 流動状態

$P=4.0, H=3.0, Re=500$

$P=6.0, H=3.0, Re=500$

$P=10.0, H=3.0, Re=500$

$P=16.0, H=3.0, Re=500$

図4 無次元流れ関数 ψ (P の影響)

図2 壁付近の格子点

わち加熱面に沿って流れ込んでいるのが明白に現れている。

図4に、複数ノズルのピッチの、流れに与える影響を示す。ノズル・衝突面間無次元距離 $H=3.0$, $Re=500$ に対し、無次元ピッチ P を4から16まで4種類変化させている。一般に、中央ノズルからの噴出流体は第2ノズルからの流体の下側へ流れ込む。その流れ込む位置は、比較的ピッチの小さい場合、第2ノズル幅内にあったのが、ピッチの増大につれ、第2ノズル幅上流端に移動する。さらに中央ノズルと第2ノズル間に形成された循環流の領域が拡大している。

図5に $P=10$, $Re=500$ に対するノズル・衝突面間

図5 無次元流れ関数 ψ (H の影響)

無次元距離 H を0.5から6.0まで6種類変化させた場合の無次元流れ関数の変化を示す。 H が0.5および1.0程度までは衝突噴流による循環流の形成は見られないが、 $H=1.5$ および2.0で中央ノズル上壁付近に小循環流の形成がみられる。 $H=6.0$ にいたっては、ノズル間、および第2ノズル上壁面付近に大循環流が現れる。また、単一ノズルの場合、噴出流体が衝突後、下流衝突面上に局所熱伝達の減少の原因となる小渦が現れるが⁽⁷⁾、複数ノズルでは第2ノズルからの噴出のため衝突面上の小渦は形成されない。

図6に、 $H=3.0$, $P=10$ に対するノズルレイノルズ数 Re の影響を示す。 Re が低いと噴流が衝突した後の流動方向の変化が著しく、 Re の影響はノズル間の循環流の大きさに現れる。しかし、 Re が500程度以上になると流れ関数の状態にはそれほど著しい差は現れていない。

4・2 局所熱伝達 前節で述べた流動状態に対する局所熱伝達の変化を検討する。

図7において、流路内の流体の温度上昇を単一ノズルと複数ノズルで比較する。単一ノズルの場合、噴流が加熱面に衝突後、下流方向に温度上昇が得られる。

図6 無次元流れ関数 ψ (Re の影響)

複数ノズルでは、ノズル間で温度上昇が生じた後、第2ノズルより、中央ノズルと同じ T_0 の流体が噴出するためいったん、温度が低下した後、下流に向かって温度上昇域が増大する。

図8に、 $H=1.0$, $Re=800$ に対する無次元ノズルピッチの変化が局所ヌセルト数に及ぼす影響を両対数関係で示す。横軸は中央ノズル中心からの流れ方向の無

(a) 単一ノズル ($H=3.0$, $Re=500$)

(b) 複数ノズル ($P=16.0$, $H=3.0$, $Re=500$)

図7 無次元温度 θ

図8 局所ヌセルト数 Nu (P の影響)

図10 局所ヌセルト数 Nu (Re の影響)

図9 局所ヌセルト数 Nu (H の影響)

図11 局所ヌセルト数 Nu (Re_2 の影響)

次元距離である。同時に $Re=800$, および流量が3倍となった $Re=2400$ に対する単一ノズルの衝突噴流熱伝達の値を破線で示している。局所熱伝達は中央ノズルによる衝突噴流の岐点の熱伝達より下流へ減少し、第2ノズル下わずかに上流側より上昇しはじめ、第2ノズルより下流側で極大値を取り $Re=2400$ の単一ノズルによる値に漸近する。熱伝達の上昇には、流量の増大による熱伝達のレベルの増大と、 $Re=2400$ の単一ノズルにより得られる値より大きい部分、すなわち流体の衝突による増大の部分とに分けられる。

図9に、 $P=10$, $Re=500$ に対するノズル・衝突面間無次元距離 H の影響を示す。 H の小さいほど、局所ヌセルト数の値は高く、第2ノズル前の Nu の極小値および第2ノズル付近の極大値の位置が H の増大につれて下流に移動している。これは図5の無次元流れ関数の挙動と対応し、第2ノズルからの流れの下側で、中央ノズルからの流れが入り込むところで Nu が極大値をとっている。定量的には、第2ノズルによる Nu の極大値と極小値の比は、 $H=0.5$ で約1.6, $H=6.0$ で約1.2となり、 H が小さいほど第2ノズルの影

響は増大する。

図 10 に $P=10$, $H=3.0$ に対し, 熱伝達に与える Re の影響を示す。 Re の増大は熱伝達のレベルを増大させるが, 第 2 ノズルによる局所ヌセルト数の極大値の位置はほとんど変化しない。比較的レイノルズ数の低い場合, 第 2 ノズルによる熱伝達の増大開始が相対的に早くなる。

図 11 に第 2 ノズル出口におけるレイノルズ数 Re_2 の局所ヌセルト数に与える影響を示す。図 8 から図 10 までの結果は中央ノズルおよび第 2 ノズルとも同じ Re の噴流を噴出させた場合であるが, その場合第 2 ノズル下の極大値の位置は変化しない。しかし, Re_2 が中央ノズルの Re より増大すると熱伝達係数の増加のみならず, 極大値の位置が下流側へ移行し, 影響領域 (伝熱促進域) の拡大も得られる。

5. 結 言

複数ノズルによる衝突噴流熱伝達の特性を基礎的に検討するために, 3-スリット・ノズルの層流噴流による衝突噴流熱伝達の伝熱流動を数値的に求め, 以下の結果が得られた。

3-スリット・ノズルによる局所熱伝達の増大には, 第 2 ノズルからの噴流の影響による熱伝達の上昇と,

流量の増大による熱伝達の上昇に分けられる。スリット・ノズルのピッチ, ノズル・衝突面間距離および Re の変化が, ノズル間の循環流の形成および, 中央ノズルからの流体が第 2 ノズルからの流体の下側に流れ込む位置に影響を及ぼし, それに対応して第 2 ノズルからの噴流による局所ヌセルト数の極大値の位置が移動する。

実用的には, 物体の熱伝達および温度をどのレベルに維持するかにより, ノズルピッチ, ノズル・衝突面間距離, レイノルズ数を決定しなければならない。本研究で行った各種パラメータを変化させた結果は, それらを決定する際の基礎的資料になり得ると考える。

文 献

- (1) 一宮・小林・越後, 機論, 52-474, B(1986), 904.
- (2) 一宮・小林・越後, 機論, 52-481, B(1986), 3304.
- (3) 一宮・小林・越後, 機論, 53-486, B(1987), 511.
- (4) Martin, H., *Advanced in Heat Transfer*, (1977), 12, Acad. Press.
- (5) Gardon, R., and Akfirat, J. C., *Trans. ASME, Ser. C*, 88-1(1966), 101.
- (6) Gosman, A. D., ほか 4 名, *Heat Mass Transfer in Recirculating Flows*, (1969), 89, Acad. Press.
- (7) Law, H. S., and Masliyah, J. H., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 27-4(1984), 529.