

## 223 音波で励起した衝突噴流による平板熱伝達の増進

*Heat Transfer Augmentation of Tone-Excited Impinging Jet on the Flat Plate*

正 小幡 輝夫 (帝京大・理工) ○松永 吉晃 (日信工業 (株))

Teruo OBATA, Teikyo University, Utsunomiya, Tochigi and  
Yoshiteru MATSUNAGA, Nisshin Industry Co. Ltd.**Key words**: Impinging Jet, Heat Transfer Enhancement, Acoustic Excitation,  
Flow Visualization, Shear Layer Instability

## 1. まえがき

ノズル加熱平板間距離がノズル直径の4倍以内、ノズル直径よりも広い領域の熱伝達を増進させることを目的とし、音波で励起させた円形噴流を加熱平板に垂直に衝突させた場合の熱伝達特性を調べ、流れ場の計測結果と併せて伝熱増進効果について考察している。

## 2. 実験装置・方法

装置全体の概要および座標系を図1に示す。出口直径  $d=28\text{mm}$  の噴流ノズルと、その外側に内径  $40\text{mm}$  の音波ノズルとがある同心二重ノズルである。音波ノズルは軸方向に移動可能で、平板側へ移動した距離を  $k$  で表わす。スピーカからの音波はリング状の両ノズルの空間を伝搬させている。加熱平板は厚さ  $20\text{mm} \times 260\text{mm} \times 400\text{mm}$  のアクリル樹脂製板に厚さ  $30\mu\text{m} \times$  幅  $22\text{mm} \times$  長さ  $240\text{mm}$  のSUS箔を11枚接着し、これらを直列に配線して通電加熱している。SUS箔の裏面には線径  $100\mu\text{m}$  のCC熱電対が岐点を含めて29箇所半田付けされている。アクリル樹脂板の裏面と側面への熱損失を極力なくす工夫を施してある。熱伝達率の計測における不確かさは  $\pm 1.5(95.4\%)$  以内である。

実験条件は次の通りである。①噴流初期速度  $u_0=10\text{m/s}$  ( $\text{Re}=18800$ ) 一定である。②音波励起しない場合 (ノーマル噴流)、音波で励起した噴流 (周波数  $40\text{Hz}$ 、ノズル出口端の音の強さ  $1\text{W/m}^2$ ) を用いている。③ノズルのオフセット量  $\varepsilon (=k/d)$  は0と0.5の2種類である。④噴流ノズルと平板間距離  $H$  は  $1 \leq H/d \leq 4$  である。

## 3. 実験結果及び考察

3.1 局所熱伝達率特性 局所熱伝達率分布の例を図2に示す。図2(b)の0%は  $\varepsilon=0$  のノーマル噴流における熱伝達率の値である。局所的には  $r/d=0.5$  で最も高い熱伝達率を示し、 $r/d=2$  付近に第2の極大が現れている。前者はノズル構造に伴うエントレーンの影響、後者はかく乱の成長により温度境界層をはがす運動が盛んになる

ことによる熱伝達の増加で極大が現れたと推考される。

ノーマル噴流で  $\varepsilon=0.5$  の場合も、ほぼ同様な熱伝達率分布となり、オフセットによる変化は特に見られない。

これに対して、音波で励起した噴流が衝突する場合の熱伝達率分布の特徴は次の通りである。(1)  $\varepsilon=0$  の場合、 $0 \leq r/d \leq 2$  と  $r/d > 2$  とでは熱伝達率特性に相異が見られ、 $r/d > 2$  では岐点から離れるのに伴い熱伝達率が漸減するが、ノーマル噴流の場合 (●、○印) の値に比べて相対的に高い値を示している。他方、 $0 \leq r/d \leq 2$  の範囲では岐点における熱伝達率とほぼ同値となる特徴が見られる。局所的には  $r/d < 1$  での熱伝達率はノーマル噴流の場合に比べてやや小さく、逆に  $1 \leq r/d \leq 2$  での熱伝達率は増加する傾向にある。(2)  $\varepsilon=0.5$  の場合、 $\varepsilon=0$  のノーマル噴流の場合に比べて大部分の領域で熱伝達率 (■印) が増加している。また、励起噴流の  $\varepsilon=0$  の場合に比べても、 $r/d > 1.5$  において熱伝達率の増加割合がやや小さくなるものの、 $r/d \leq 1$  での熱伝達率は大きく増加している。

ノズル加熱平板間距離を  $H/d=3 \sim 4$  に変化させた場合、熱伝達率の全般的な増減傾向も  $H/d=2$  とほぼ同様であるが、 $H/d=3$  の場合、 $\varepsilon=0.5$  では  $1.75 \leq r/d \leq 3$  で熱伝達率の減少が最大10%程度になる位置もあり、 $H/d=2$  における約5%減に比べて大きいことや、 $r/d > 3$  では最大15%の増加することが  $H/d=2$  の場合と相異している。

3.2 総伝熱量の増減 総伝熱量の増減率を表1に示す。各実験条件で得られた局所熱伝達率分布をノズル直径の8倍 (面積比で64倍) の領域に渡って積分し総伝熱量を求めている。そして、 $\varepsilon=0$  でノーマル噴流の場合の総伝熱量と各条件下との差を求め、それらをノーマル噴流の場合の総伝熱量で除算して増減率を求めている。

この増減率で伝熱増進効果を評価すると、ノズルの移動だけに伴う場合の熱伝達増進は  $-1.74 \sim 1.87\%$  であり、不確かさの解析結果  $\pm 1.5\%$  (95.4%) と同程度である。他方、音波で励起された噴流で  $\varepsilon=0.5$  の場合には、最大10%の伝熱増進が期待できる。また、増進が期待できるノズル加熱平板間距離は、 $2 \leq H/d \leq 44.8$  であり、 $\varepsilon=0$  の励

起噴流に比べて伝熱増進がよく、ノズル-平板間距離の範囲もやや広がっている。

**3.3 伝熱増進のメカニズム** 流れの特性<sup>(1)</sup>によると、音波励起により噴流せん断層に生じる渦は、ノズル直後からスケールの大きな渦が生じ、流下に伴って成長する。それは噴流コア部へも影響が及び、噴流中心線上での流速はノーマル噴流に比べて約25%( $\epsilon=0$ )~30%( $\epsilon=0.5$ )も減少する。逆に乱れは4.8倍( $\epsilon=0$ )に増加している。

加熱壁面上の流れの可視化例を図3に示す。スモークワイヤーを噴流軸と平行に設置して撮影した結果である。励起噴流の場合、ノーマル噴流の場合に比べて加熱壁面上に渦構造が明瞭にとらえられている。伝熱実験結果と総合すると次のことがいえる。①岐点を含む噴流衝突領域、壁噴流領域においても加熱壁面に垂直方向の運動が盛んになる。②この運動は温度境界層をはがし、低温の流体塊が直接加熱面に接触する頻度を増すことになり、熱伝達率の増加を促進する。③ $\epsilon=0.5$ の場合、 $\epsilon=0$ の場合よりもオフセット効果で音波の拡散に方向性を与え、せん断層の渦の成長がより促進され乱流遷移化が進む。こうした大きなスケールの渦の噴流が加熱面に衝突すると温度境界層をはがす運動がより強まるために岐点を含めて広い領域で熱伝達が増進されると解釈できる。

#### 4. あとがき

$Re=18800$  の円形衝突噴流のせん断層に強さ  $1W/m^2$ 、周波数  $40Hz$  の音波与え、渦を成長させた噴流を加熱平板に衝突させて熱伝達の実験を行い、流れの実験結果と併せて伝熱増進の効果とそのメカニズムについて論じた。

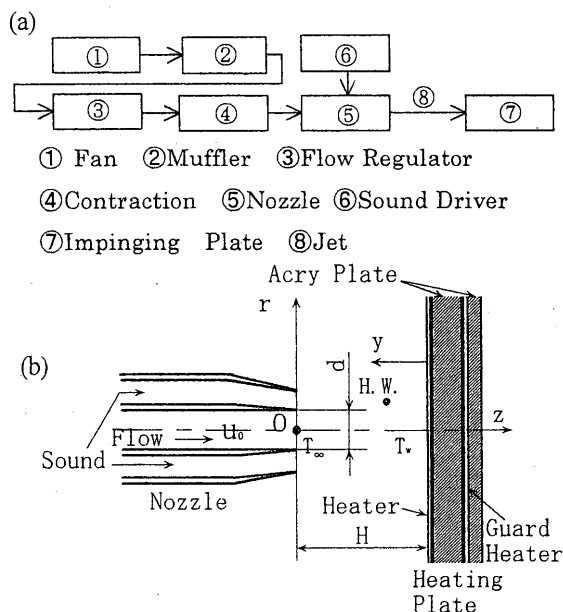


Fig. 1 Experimental apparatus of acoustically excited jet impinging upon a heated flat plate: (a) overall experimental setup; (b) acoustically excited jet arrangement.

参考文献 (1)小幡,平野,秋山, 機論,7-658-B (2001)142-148  
(2)松永,金井,小幡,機講論,'01 鳩山 217-218.

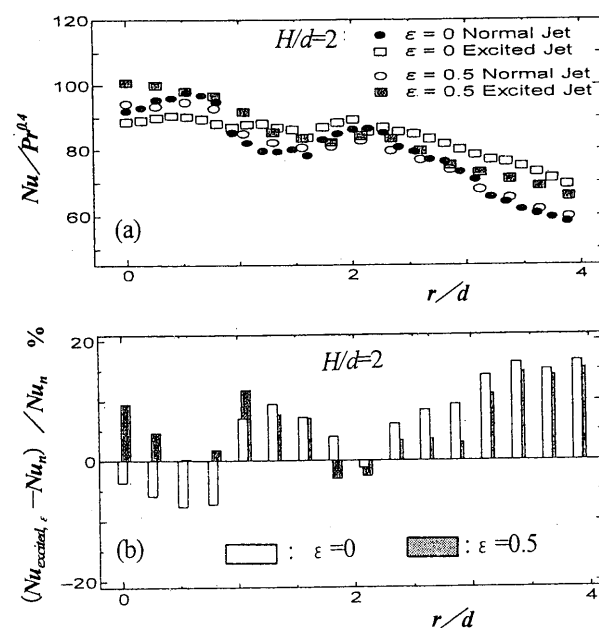


Fig. 2 Effect of acoustic excitation on local heat transfer coefficient: (a) distribution of heat transfer coefficient  $H/d=2$ ; (b) enhancement of local heat transfer coefficient to  $H/d=2$ .

Table 1 Effect of acoustic excitation on average heat transfer of several impinging length.

| $H/d$ | ①    | ②     | ③    | ① : $\epsilon=0$ , ② : $\epsilon=0.5$ ,<br>$(\overline{Nu_{excite,\epsilon}} - \overline{Nu_n})/\overline{Nu_n}$<br>③ : Unexcited jet<br>$(\overline{Nu_{n,\epsilon=0.5}} - \overline{Nu_n})/\overline{Nu_n}$<br>$\overline{Nu_n}$ : Nusselt number of<br>unexcited jet; $\epsilon=0$ . |
|-------|------|-------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | 7.1% | —     | —    |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 2     | 8.6  | 10.0% | 1.9% |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 3     | 3.8  | 5.1   | -1.7 |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 4     | 0.1  | 4.6   | 1.5  |                                                                                                                                                                                                                                                                                         |

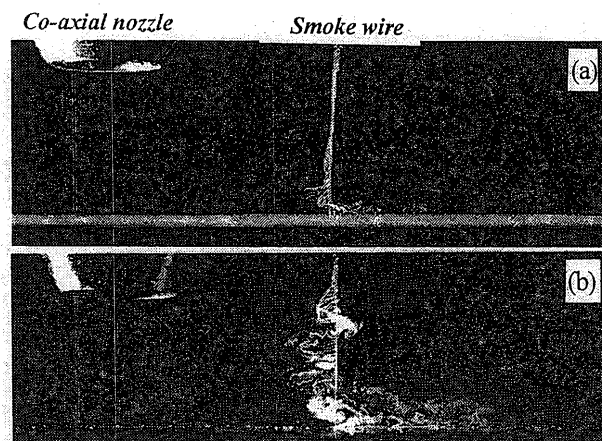


Fig. 3 Typical smoke wire photographs of the unexcited jet and acoustically excited jet impinging upon a flat plate: composedness plane view of wall jet region; (a)  $H/d=3$ ,  $\epsilon=0$ , normal jet, (b)  $H/d=3$ ,  $\epsilon=0.5$ , excited jet. Smoke wire position is  $r/d=3$ .