流路内の複数突起が、対向平滑面上の伝熱・流動に 及ぼす影響について* (突起の形状の影響)

一 宮 浩 市**, 横 山 正 人***

Effects of Artificial Roughness Elements for Heat Transfer and Flow Situation on a Smooth Heated Wall in a Parallel Plate Duct (On the Shape of Roughness Element)

by Koichi ICHIMIYA and Masato YOKOYAMA

Heat transfer characteristics on the smooth heated surface, opposite the roughness elements on the insulated wall, were experimentally determined by flowing air through a parallel plate duct and by changing the shape of the roughness elements. The most developed heat transfer coefficients were obtained as functions of Re and the size of roughness elements for the optimum pitch. The correspondence between heat transfer and flow situation revealed that the effects of the acceleration and the turbulence, produced on the smooth heated surface, were different for each shape of the roughness elements. These effects contributed to the increase of local heat transfer.

Key Words: Thermal Engineering, Convective Heat Transfer, Turbulence, Turbulence Promoter, Experiment

1. 緒 言

突起を用いて伝熱促進を行う場合、これまでほとんどの研究において、突起は伝熱面上に設置されてきた^{(1)~(3)}。この場合あらさによる拡大伝熱面と乱れの効果が互いに影響しあい伝熱促進の機構が複雑になっている。そのため基礎的に乱れ促進体のみの伝熱面への影響について検討することは重要である。さらに従来の研究では発達区間の伝熱評価が主になっているが、実際面から考えた場合、乱れ促進体による未発達域の占める割合も多く、その区間の伝熱、流動特性を知ることも必要である。

以上の二つの観点より本研究では、平行平板流路の上面を断熱状態にして突起を設け、下面を平滑伝熱面とし、空気を流体として利用することにより実験を試み、以下の事柄を検討することを目的とする。

(1) 流路壁に設置された突起のみの作用をとり出す一つの試みとして突起の、対向平滑面上の熱伝達に及ぼす影響を明らかにする。

(2) 最初の突起から、ほぼ発達する領域までの伝熱流動特性を求める。

(3) 前述の(1)、(2)について突起形状による相違を検討する。

次に主な記号の説明をする。

D_H : 水力学的相当直径($\equiv 2H$), m, mm

H : 平行平板流路間隔, mm

Nu_0 : α_0 によるヌセルト数($\equiv \alpha_0 \cdot D_H/k$)

Nu_m : 平均ヌセルト数 (式(6)参照)

Nu_{max} : α_{max} によるヌセルト数

P_i : 突起のピッチ, mm

ΔP : 圧力差, kg/m²

q : 熱流束, W/m²

Re : レイノルズ数($\equiv U_m \cdot D_H/\nu$)

T_m : 混合平均温度, K

T_w : 伝熱面温度, K

X : 加熱開始点からの距離, m, mm

X' : 突起開始点より α_{max} までの距離, m, mm

U_m : 流路断面平均流速, m/s

U_0 : 平滑流路断面最高流速, m/s

$\bar{U}$: 局所時間平均流速, m/s

$\sqrt{U'^2}/\bar{U}$: 乱れ強さ

* 昭和60年6月22日 東北支部郡山地方講演会において講演, 原稿受付 昭和59年10月23日。

** 正員, 山梨大学工学部(〒400 甲府市武田4-3-11)。

*** 正員, (株)東芝総合研究所(〒210 川崎市幸区東芝町1)。

- α : 局所熱伝達係数, $W/m^2 \cdot K$
 α_{max} : ほぼ発達した熱伝達係数, $W/m^2 \cdot K$
 α_0 : 最初の突起前の熱伝達係数 (平滑流路における発達した値), $W/m^2 \cdot K$
 ε : 突起の高さ, mm

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置の概略 実験装置の概略を図1に示す。試験部は流路間隔 H の可変な平行平板流路で流路幅 300 mm, 全長 2420 mm であり送風機の吸込側に設置され, 流体としての空気はベルマウス状入口を経て矢印の方向に流れる。空気流量はピトー管を流路断面上にトラバースさせることにより求めた。乱れ促進体としての突起(図2参照)は流路入口より 1640 mm (加熱開始点より 940 mm) から始まり断熱された流路上板に流れと直角に流路幅全体に設置された。

加熱は流路下面, 入口より 700 mm の位置で開始され, 加熱区間 1510 mm である。加熱部は厚さ 1.8 mm の銅板と 4 分割されているラバーヒータ (ニクロム線を並列に密に配置し薄いラバーで被覆されている) からなり, 加熱電源は交流 100 V で通電した。なお, 任意の位置における流れに直角方向の空気の温度を測定し, 加熱面上の温度こう配を求めた結果, 加熱が一様に行われていることを確認した。流路下面の伝熱面温度 T_w は素線径 0.1 mm の C-C 熱電対を加熱板裏面に流路中心に沿って 104 本取り付け熱起電力を測定して求めた。加熱板の下側は補償ヒータを設け, 下面からの熱損失を防いだ。

流動実験では, 一様加熱面 (a_1 - a_1) を, 孔内径 0.8 mm の静圧タップを設けた平滑アクリル板 (a_2 - a_2) に取り換え, 非加熱状態で行った。静圧差測定には

0.098 Pa (0.01 mmH₂O) の精度で測定可能なマイクロメータと水マノメータを使用した。伝熱面近傍の流動状態 (速度, 乱れ) は熱線風速計 (KANOMAX 7114-1010) を用いプローブを流路上面よりそう入し, 流れ方向, 流れに直角方向に駆動し測定した。実験条件は表1に整理した。

2.2 実験方法 まず突起を設置しない平滑な平行平板流路の伝熱流動の実験を行った。図3に Nu の結果を示すが, 平行平板流路の片側加熱の場合の Hatton による計算結果⁽⁴⁾ とほぼよい一致をみた。その後, 突起を設置した実験に移行した。

流路間隔 H を設定した後, 突起を上板に流れに直角にピッチ P_i で設置し, 規定の空気流量を流し流路下面のヒータに通電した。正味加熱量としては電気入力より損失量を差引いた量を用いた。加熱開始点付近の流れ方向の非加熱側への熱伝導損失は加熱壁の温度分布を求め, 一次元的に熱が移動するとして評価すると全加熱量の約 0.1 %, 流路側板と大気間あるいは断熱材と大気間を自然対流熱伝達で評価し, 試験部全体の熱損失を求めると 5 ~ 6 % であった。なお温度レベルから考え, ふく射損失は無視した。空気入口温度は直接測定した。任意の位置における混合平均温度 T_m を, 流量と, 加熱開始点から, その位置までの発熱量から計算により求めた値と実測値とを比較した結果, 約 ± 1 % の差であったので以後計算値を用いた。局所熱伝達係数は次式で求めた。

$$\alpha = q / (T_w - T_m) \dots\dots\dots (1)$$

本実験で得た熱伝達係数は再現性を見るため各条件で4回ずつ実験を行ったが, 誤差を考慮して検討すると ± 4 % 以内に落ち着いた。

流動実験では, 突起を設置する前に平滑流路における速度分布, 乱れ強さの分布を熱線風速計にて求めた。その結果, 突起を設置する付近ではほぼ発達した値が, 流路断面内中央 2/3 について得られ, したがって流路幅の中心では流れはほぼ二次元性が保たれていると判断した。その後, 突起を設置した流路の実験に移行した。実験データは局所時間平均流速 $\bar{U}$ と平

表 1 実験条件

Reynolds Number	Re	$10^4 \sim 2 \times 10^5$
Heat Flux	$q \text{ w/m}^2$	711 ~ 780
Distance Between Upper And Lower Plate	H mm	20, 25, 30, 35, 40
Pitch Of Roughness Elements	P_i mm	20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200

図 1 実験装置

図 2 突起の形状

滑流路における時間平均の断面内最高流速 U_0 の比 $\bar{U}/U_0$ 、局所乱れ強さ $\sqrt{U'^2}/\bar{U}$ 、流路入口との静圧差 ΔP と平均流速を用いた動圧の比 $\Delta P/(1/2)\rho U_m^2$ で整理した。

さらに流動様式を対応させるために、流体に水を用い流路間隔が 100 mm、突起高さ 30 mm、ピッチ 200 mm、 Re が約 7000 に対する可視化実験を染料を用いて行った。

3. 実験結果および検討

3.1 局所熱伝達係数 突起と対向した平滑伝熱面上の局所熱伝達係数を図 4 に示す。局所熱伝達係数 α と、突起のない平滑流路において得られるほぼ発達した値に相当する突起前の極小熱伝達係数 α_0 との比をとることにより熱伝達の向上度合を表した。横軸は加熱開始点からの距離である。突起の形状が変化しても局所熱伝達係数の流れ方向の分布状態は同様であったので代表的に三角突起 B に対して示した。局所熱伝達係数は、最初の突起の上流側より増大しはじめ、突起の真下付近で小さい極大値をとり、その後さらに上昇し、ほぼ発達したと思われる値に達し、最後の突起前後より下降し平滑流路の発達した値に漸近する傾向である。突起の効果としては、 Re が大きいほど α/α_0

の値は増大し、顕著に現れている。図 4 の縦軸には H' ($\equiv H - \epsilon$) を流路間隔とした平滑な平行平板流路における発達した熱伝達係数を α とした値を比較のために示している。これは乱れ促進体の影響を評価する基準を乱れ促進体の根元でなく先端で評価することになる。図によると高レイノルズ数のほぼ発達した値は十分その値を超えており、突起の根元および突起の先端を基準としたいいずれの評価にも効果があることがわかる。突起形状による差の一つは突起開始点からほぼ発達するまでの距離に現れている。図 5 に示すように突起開始点から熱的にほぼ発達した $\alpha_{\max}/\alpha_0$ までの距離を X' として ϵ で無次元化した X'/ϵ と Re の関係を表したのが図 6 である。 Re が高くなるにつれ X'/ϵ が減少する傾向にあり $\alpha_{\max}$ に達する距離が少なくてよいことを示している。形状については三角突起 A と C、四角突起と三角突起 B の二つのグループに分れ、流れに対し突起の前面が傾斜していると前面が直角の場合より、熱的に発達するまでに相対的に長く距離が必要なることを表している。

各形状に対し熱伝達を相互に比較する目的で $Nu_{\max}$ と無次元ピッチ $P_i/(H - \epsilon)$ の関係を、 P_i/ϵ と流路間隔に突起の占める割合 ϵ/H をパラメータにして $Re \approx 4 \times 10^4$ に対し示したのが図 7 (a)～(d) であ

図 3 平滑平行平板流路の熱伝達

図 5 局所熱伝達係数の分布

図 4 局所熱伝達係数

図 6 X'/ϵ と Re の関係

図 7 Nu_{max} と $Pi/(H-\epsilon)$ の関係 ($Re \approx 4 \times 10^4$) 図 8 α_{max} と ϵ/H および Re の関係

る。図より流路間隔を一定にした時の熱伝達に対する最適ピッチが 50~100 mm に存在することがわかる。このことは文献(5)において $P_i=70$ mm でよい熱伝達を得たことにも対応する。また同じ形状でピッチを変化させた時の相互の関係も表している。

前図より明らかになった熱伝達に対する最適ピッチは 50~100 mm であるが、平均的に $P_i=70$ mm に注目し、それに対するほぼ発達した熱伝達係数 α_{max} について Re を含めて整理したのが図 8 である。流路に対する突起の占める割合 ϵ/H を考慮して $(\epsilon/H)^6 Re$ を横軸にとっている。 $(\alpha_{max}-\alpha_0)/\alpha_0$ の $(\epsilon/H)^6 Re$ の傾きは 0.45~0.50 で各形状とも大差はないが、平滑流路からの改善度合は相対的に三角突起 B、四角突起と三角突起 C、三角突起 A の順になり、 Re の大きいほど良好である。最小二乗法で実験式を求めると、

三角突起 B に対して

$$\frac{\alpha_{max}}{\alpha_0} = 1.0 + 0.133 \left(\frac{\epsilon}{H} \right)^{2.67} Re^{0.45} \quad \dots\dots\dots (2)$$

図 9 平均ヌセルト数

三角突起 C と四角突起に対し

$$\frac{\alpha_{max}}{\alpha_0} = 1.0 + 0.095 \left(\frac{\epsilon}{H} \right)^{2.80} Re^{0.47} \quad \dots\dots\dots (3)$$

三角突起 A に対し

$$\frac{\alpha_{max}}{\alpha_0} = 1.0 + 0.065 \left(\frac{\epsilon}{H} \right)^{2.99} Re^{0.50} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし α_0 は図 3 により得られる平滑平行平板流路に対する発達した熱伝達係数で次式で求められる。

$$\alpha_0 = 0.028 \left(\frac{k}{D_H} \right) Re^{0.75} \quad \dots\dots\dots (5)$$

3.2 平均ヌセルト数 熱伝達の一つの評価として、突起の影響が現れはじめた点から局所ヌセルト数を流れ方向に平均し平均ヌセルト数として次式を定義した。

$$Nu_m = \frac{\int_0^x Nudx}{x} \quad \dots\dots\dots (6)$$

Nu_m と突起前の極小の局所熱伝達係数に対するヌセルト数 Nu_0 との比を形状をパラメータにして示した

のが図9である。図4の局所熱伝達係数と比較し、分布が流れ方向に平滑化し、また突起の伝熱面への影響度合を流れ方向に比較する上でも重要である。同じ条件に対する、形状による Nu_m の大小は三角突起 B, 四角突起, 三角突起 C, 三角突起 A の順であるが、突起開始点 ($X=940$ mm) における流れ方向に対する Nu_m/Nu_0 の傾きが、図6に対応して、突起前面の傾斜の有無により分類できるのは注目に値する。

3・3 熱伝達と流動との対応 本節では流動状態と、3・1節と3・2節で得られた熱伝達との対応について検討する。図10(a)～(d)に、各図とも上段に熱伝

達係数比、流路下面より 0.1 mm における乱れ強さ $\sqrt{U'^2}/\bar{U}$ 、無次元最大流速 U_{max}/U_0 、2 段めに乱れ強さの分布、3 段めに速度分布、4 段めに $\Delta P/(1/2)\rho U_m^2$ を示している。

まず四種の突起の中で熱伝達の良い三角突起 B [図10(a)] に注目する。局所熱伝達の増大に対し、伝熱面付近で最大 8% あった乱れ強さは最初の突起後増大し、突起間で極大値 18% に達し 4 ピッチ以降周期的に変化する。流路断面内の最高流速は最初の突起付近で最大となり、2 番め、3 番めにかけて減少し、その後再び増大し、4 ピッチ以降周期的変化をする。し

図 10 熱伝達と流動との対応

たがって局所熱伝達係数が最大値を維持している状態では乱れ強さも、加速の影響も周期的変化し、以後突起が続くなら、この状態が継続されると思われる。乱れ強さの流れ方向の分布は流路断面中央では4%以下で突起付近で30%近くあった値が下流になるにつれ、流路断面中央の値が増加しゆがんでくる。最初の突起付近では流路断面のほとんどの部分で最高流速に近かった速度分布は下流になるにつれ最高流速の位置が伝熱面側に近づいてくる。一方壁面静圧変化からも最初の突起による影響が2～3番めの突起付近まで及んでいるのが明らかで、その後静圧差は各突起に対し、周期的に変化しながら大きくなっている。四角突起〔図10(b)〕では形状が流れに直角のため断面内最大流速は最初の突起下で最大となり2番め、3番めにかけて減少し、その後増加し周期性が生ずる。伝熱面付近の乱れ強さは周期的変化領域で最大15%に達している。突起前面が傾斜している三角突起A〔図10(c)〕では各断面の最大流速の値は1番めと2番めの突起間で傾斜のため増大するが、三角突起Bほどでなく2～3番めの突起間で減少している。そして4ピッチ以降周期的変化をしている。伝熱面付近の乱れ強さは1～2番めの突起付近で相対的に増大し、4ピッチ以降周期性が現れるが、極大値は12%で4種類の突起の中では最も小さい。両面傾斜の三角突起C〔図10(d)〕では伝熱面付近の乱れ強さは最初の突起付近で三角突起Aと同様、相対的に大きく周期的変化は3～4ピッチ以降に生じ、極大値は約14%程度であった。

以上最初の突起から下流への流動状態を分類すると図11に示されるように流れ方向に、最初の突起の影響領域、遷移領域、周期的変化領域の3領域に区分される。一方局所熱伝達係数は、最初の2領域で上昇し、周期的変化領域でほぼ発達した値に達する。突起形状の影響としては突起の前面の形状の影響が最初に現れ、それが下流の周期的変化領域の乱れ強さ $\sqrt{U'^2}/\bar{U}$

図 11 伝熱と流動の領域区分

あるいはほぼ発達したと思われる熱伝達係数 α_{max} に影響を及ぼしている。すなわち前面が流れに直角の場合(三角突起B、四角突起)、最初の突起の影響領域では加速の影響が強く現れ、それに対し前面が傾斜している場合(三角突起A、三角突起C)、相対的に乱れ強さが強く現れている。しかし周期的変化領域ではこの傾向が逆になっている。

3・4 流動様式 上述の流動状態を確認するため水による可視化実験を行い観察した結果を図12に示す。空気による伝熱流動実験と直接対応はとれないが定性的には説明がつくと思われる。図の上段には四角突起を設置し染料を下面に沿って流した場合の写真例を示す。下段に各突起形状に対する流動様式を模式的に表示した。熱伝達の良好な三角突起Bでは、上板の突起の下流側で再付着する位置にほぼ対応して(突起と突起の間の減速域で)下面の伝熱面側には上向き流れが生じ小渦が形成される。その後、次の突起の上流側に小循環流が生ずる付近より下面では加速が支配的で小渦が消滅する。この上向き流れが生じ小渦が形成される領域が図10の乱れ強さの高い領域に対応し、局所熱伝達の増大に寄与していると思われる。次に突起の形状による差を検討する。突起の後面の形状を同じにして前面の傾斜の有無による比較を行うと、四角突起と三角突起Aでは四角突起が、三角突起Bと三角突起Cでは三角突起Bが相対的に突起間における上向き流れ、小渦の形成が強い。突起の前面の形状を

図 12 流動様式

同じにして突起の後面の傾斜の有無による比較を行うと四角突起と三角突起 B では三角突起 B が、三角突起 A と三角突起 C では三角突起 C が、相対的に突起間で上述のことが現れる。以上の事柄を総合すると、突起前面が流れに直角で、後面を傾斜させたほうが対向平滑伝熱面近傍の乱れの形成が強く、このことは前節の乱れ強さとの対応および熱伝達の結果より三角突起 B が良好であることにも対応する。

4. 結 言

平行平板流路の上面を断熱にして、複数突起を設け下面を平滑伝熱面として、突起の相対する伝熱面への影響を突起の形状を変化させて実験的に検討した結果次のことが明らかになった。

(1) 最初の突起後、流動状態は突起の形状にかかわらず(A)最初の突起の影響する領域、(B)発達するまでの遷移領域、(C)ほぼ発達した領域(乱れ強さおよび流速比が周期的に変化する領域)に区分され、最初の2領域で局所熱伝達係数が上昇し、周期的変化領域で、ほぼ発達した値が得られる。ほぼ発達した熱伝達係数が得られる位置は突起の前面の形状により分類で

きる。

(2) 突起の前面の形状が流れに直角の場合、最初の突起の影響領域では特に加速の影響が強く現れ、ほぼ発達した領域では乱れ強さが増大する。突起の前面が傾斜している場合は相対的にその逆の傾向となる。

(3) 突起と突起の間の減速域に対応して下面の伝熱面側には上向き流れ、小渦が形成される。これは伝熱面付近の乱れ強さの大きい領域に対応し、局所熱伝達係数の増大に大きく寄与している。

終わりに、本研究を進めるにあたり有益なご助言をいただいた九州大学工学部 長谷川 修教授および福井工業大学 下村龍助教授に深く謝意を表す。

文 献

- (1) Williams, F. and Watts, J., *Proc. 4th Int. Heat Transfer Conf.*, FC-5.5(1970), 1.
- (2) Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. G., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 14-4 (1971), 601.
- (3) Lewis, M. J., *J. Heat Transfer*, 97-2 (1975), 249.
- (4) Hatton, A. P. and Quarmby, A., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 6-10(1963), 903.
- (5) Ichimiya, K., Yokoyama, M. and Shimomura, R., *Proc. ASME/JSME Thermal Eng. Joint Conf.*, 1(1983), 359.

討 論

〔質問〕 棚 沢 一 郎〔東京大学生産技術研究所〕
緒言中に、貴研究のねらいとして「流路壁に設置された突起のみの作用をとり出す一つの試み……」と述べられているが、同じ突起の作用といっても、突起が対向面に及ぼす作用と、通常の伝熱促進で採用されているような、突起がその設置されている伝熱面に及ぼす作用とは、性格をかなり異にする。したがって、本研究の価値は、貴報でテストされたような突起によって、対向面の伝熱がどれだけ効率よく促進できるか、その効果が従来の突起による促進法と比較して優れているかどうかにかかっていると言えよう。この点について、著者らはどのような見通しをもっておられるか伺いたい。

〔回答〕 突起の作用に関する基本的考えについては同じ意見である。

本研究で行った突起の、相対する平滑伝熱面への影響としては突起の流路内に占める割合が比較的大きい場合、すなわち比較的狭い流路に対して効果があり、かなりの伝熱促進が得られている。また伝熱性能を高

めるための最適条件(幾何学的条件、流動条件など)が存在するものと考えている。

一般的に突起の作用を、伝熱面側に設置した場合と対向面側に設置した場合で比較すると、伝熱面側に中実の突起(ソリッドタイプ)を設置した場合、伝熱面への流れの再付着の効果が、対向面側では突起による加速および突起間に対応する面での乱れ促進効果が主な作用として局所熱伝達の増大に寄与していると考えられている。これらを考慮した場合、突起による伝熱促進法としての優劣は、突起を用いる条件により異なり、現状ではどちらが優れているか、一概には言えない。実用性を考えた場合、どちらが優れているかというよりはむしろ、条件によっては両方法を併用することにより流路内の突起による伝熱促進をより効果的に行うことにあると言える。伝熱面側に突起を設置しても条件によっては対向面側の局所熱伝達もかなり促進されているので、突起の配置を工夫すればより効果的な伝熱促進が得られると考えている。