突起付伝熱面の熱伝達*

(突起表面と基板表面の熱流束が異なる場合の局所熱伝達率)

菱 田

誠^{*1}

Heat Transfer of Ribbed Surfaces (Local Heat Transfer Coefficient with Different Heat Fluxes for Rib and Basic Surfaces)

Makoto HISHIDA

This report deals with the experimental study which focused on the relationship between the local heat transfer coefficient of ribbed surfaces and the heat flux ratio (the ratio of heat flux on the ribbed surface to the one on the base surface). Experiments were carried out with a parallel channel with a ribbed lower surface and a smooth upper surface. Square bars were attached to the lower surface. Heat flux ratio ranged from 0.5 to 2.5, Reynolds number from $3 \times 10^3 - 1 \times 10^5$, the ratio of pitch to the height of the rib from 2.5 to 60 and the ratio of the height of rib to the hydraulic diameter of the parallel channel from 0.0324 to 0.174.

Key Words: Ribbed Surface, Local Heat Transfer Coefficient, Forced Convection, Heat Transfer Augmentation, Experimental Study, Nonuniform Heat Flux

1. はじめに

突起付き伝熱面の局所熱伝達についての実験的研究, 理論的研究はいくつかある^{(1)~(5)}が, そのほとんどは伝熱面の熱流束が一定, あるいは壁温が一定という条件下における研究である。しかしながら, 原子炉の燃料棒, 熱交換器の伝熱管などが実際に使用される条件は熱流束一定・壁温一定のいずれにも当てはまらない場合がある。突起付き伝熱面は伝熱促進技術としていろいろな機器に使用されており, 実際の使用条件下における局所熱伝達について調べておくことは重要であると考えられる。本報では, そのような場合の局所熱伝達を検討する一つの試みとして, 正方形断面をした棒状の突起を多数個取付けた突起付き伝熱面について, 突起表面の熱流束(q_p)と, 突起と突起の間の基板表面の熱流束(q_b)との比(熱流束比: q_p/q_b)を広範囲に変えて実験を行い, 局所熱伝達率と熱流束比との関係を調べた。ただし, 突起表面の熱流束および基板表面の熱流束のそれぞれは一樣に保った。

2. 実験装置と方法

文献(1)と同じ実験装置で実験を行った。実験装置は送風機, 流量測定装置, 空気温度調節用電気加熱器, 助走流路(約9m, 50直径), 試験部, 出口ガス混合器等で構成されている。試験部は図1に示すように幅907mm, 高さ95.5mm, アスペクト比9.4, 等価直径(De)173mmのく形流路の下壁に正方形断面をした棒状の二次元突起を多数個取付けて構成されている。平行平板流路の上壁および下壁はベークライト板に厚さ50 μ mのステンレスはくを張付けたものであり, ステンレスはくに直接通電することによって一樣熱流束の条件で加熱する。また, 図1に示すように, 加熱開始点から約1730mmの位置に取付けた試験用突起1個も加熱面と同様, ベークライト板に50 μ mのステンレスはくを張付けたものであり, 直接通電によって加熱する。これらのステンレスはくをそれぞれ独立の電気系統で加熱することによって突起表面の熱流束(q_p)と, 突起と突起の間の基板表面(下壁)の熱流束(q_b)との比(q_p/q_b)を変えた。ステンレスはくの裏側には多数個のCA熱電対を取付け, 伝熱面の温度分布を測定して局所熱伝達率を求めた。加熱面から約100mm離れた所には補償ヒータを設け, 熱損失を少なく抑えた。

* 平成元年7月14日 東海支部岐阜地方講演会において講演。
原稿受付 昭和63年5月16日。

*1 正員, 日本原子力研究所 (〒311-11 茨城県那珂郡東海村白方)。

試験用突起の前方には3~20個の突起を、後方には1~5個の突起を取付け、試験区間で周期的な速度場・温度場が得られるようにした。試験用突起以外の突起はアルミニウムの角パイプであるが、取付け状態(基板の上に置き、両端を側壁に固定した)から考えて、基板温度と空気温度のほぼ中間の温度に保たれていると考えられる。実験は常温、常圧の空気で行った。試験部における空気の混合平均温度は入口・出口の空気温度の測定値(それぞれ9本のCA熱電対で測定した)から内挿によって求めた。局所熱伝達率(α_x)は、試験部の混合平均空気温度、加熱面の温度分布、電気発熱量から熱損失を補正して求めた熱流束、から求めた。

実験条件は以下のとおりである。

熱流束比(q_p/q_b): 0.5~2.5

(上壁の熱流束と下壁の熱流束は同一である)

レイノルズ数(Re): $3 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$

突起の種類: 3種類、主として突起2および3について実験を行った。

突起1: h_p (突起の高さ)=30 mm

w_p (突起の幅)=30 mm

$h_p/De=0.174$

突起2: $h_p=10$ mm, $w_p=11.5$ mm

$h_p/De=0.0579$

突起3: $h_p=5.6$ mm, $w_p=6.3$ mm

$h_p/De=0.0324$

突起のピッチ(p)と高さとの比(p/h_p)

: 2.5~60

局所ヌセルト数(Nu_x)およびレイノルズ数(Re)は下式によって求めた。

$$Nu_x = \alpha_x \times De / \lambda \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\alpha_x = q_p(\text{または } q_b) / (T_w - T_b) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Re = U \times De / \nu \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 λ および ν はそれぞれ空気の熱伝導率、動粘度、 U は突起の取付けていない所における空気の平均流速、 α_x は局所熱伝達率、 T_w は壁温、 T_b は空気の混合平均温度である。

3. 実験結果

図2に q_p/q_b を0.38から2.42の範囲に変えて測定した局所ヌセルト数(Nu_x)の測定例を示す。基板の局所ヌセルト数は熱流束比の増加とともにわずかに低下するが、突起表面の局所ヌセルト数は比較的大きく増加する。しかし、局所ヌセルト数の分布の形は熱流束比を変えても変わらない。

3-1 基板の局所熱伝達率と熱流束比との関係

(1) 最大点までの距離($x_{\max}$)と熱流束比との関

係 突起のピッチと高さの比が約10以上の場合には前方の突起ではなく離れた主流が基板に再付着し、再付着点近辺で局所ヌセルト数は最大となる。局所ヌセルト数が最大となる点までの距離(突起の根元から図った距離、図2参照)と熱流束比との関係を調べたが、 $x_{\max}$ の値は q_p/q_b を変えても変わらなかった。本実験程度の熱流束比では流れの状況が変わらないことを考えれば、これは当然の結果であると言える。

(2) 局所ヌセルト数の最大値($Nu_{b,\max}$)と熱流束比との関係 p/h_p が約5以下の場合には前方の突起ではなく離れた流れは基板に再付着せず、突起と突起の間に非定常的な循環流が発生するようになる。流体は、基板近傍では後ろの突起から前の突起に向かって流れ、突起前面では前面に沿って下向きに流れる。そのため、局所ヌセルト数は突起の直前で最大となる。一方、 p/h_p が約10以上の場合には再付着点近辺で局所ヌセルト数が最大となる。図3に、種々の q_p/q_b に対して求めた $Nu_{b,\max}$ と Re との関係の測定例を示す。 $Nu_{b,\max}$ は、 q_p/q_b の値にかかわらず、いずれの場合も Re のべき乗に比例した関係で整理できる。 Re

図1 試験部

図2 局所ヌセルト数の測定例

の指数は p/h_p および h_p/De によっては異なるが、 q_p/q_b の値を変えても変わらない (約 0.7~0.8)。

図 4 は $Nu_{b,max}$ を $Nu_{b,max}/\tilde{Nu}_{b,max}$ と q_p/q_b との関係で表した結果の一例である。ここで、 $\tilde{Nu}_{b,max}$ は q_p/q_b が 2 の時の $Nu_{b,max}$ である。 $Nu_{b,max}$ は q_p/q_b の増加とともに直線的に減少する。ただ、基板に再付着

図 3 基板の最大局所ヌセルト数

図 4 $Nu_{b,max}/\tilde{Nu}_{b,max}$ と q_p/q_b との関係

点がある場合 ($p/h_p \geq 10$) の $Nu_{b,max}$ の値は q_p/q_b を変えてもほとんど変化しない。

図 4 および図 5 に示すように $Nu_{b,max}$ と q_p/q_b との関係は、本実験範囲 ($3 \times 10^3 \leq Re \leq 1 \times 10^5$, $0.0324 \leq h_p/De \leq 0.174$) では Re および h_p/De によらず同じであり、次式で整理される。

$$Nu_{b,max}/\tilde{Nu}_{b,max} = a \times (q_p/q_b) + b \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 a, b は Re および h_p/De に依存しない定数である。表 1 に整理式を示す。 a は負の値であり、その絶対値は p/h_p が小さいほど大きい。

基板の最大局所ヌセルト数が熱流束比によって異なるのは、次の理由によるものと考えられる。突起表面の熱流束を大きくするほど (熱流束比を増加させることに相当) 突起表面近傍を流れる空気流の温度は高くなる。この高温の空気流が基板に衝突すると、基板の温度は高くなるが、空気流の混合平均温度はほとんど変わらない。したがって、式 (2) で定義される熱伝達率を求めると、基板の温度が高くなった分だけ、熱伝達率が減少するものと考えられる。これは、円管内流れの熱伝達において、円管の熱流束を流れ方向に急激に減少させると、熱伝達率が小さくなるのと同様な理由であると考えられる。ピッチが小さいほど、壁面近傍の流れは突起付伝熱面の表面に沿って流れ、主流と壁面近傍の流れとの混合が生じにくくなるのに対し、ピッチが大きくなると流れは突起部ではく離し、それに伴って主流温度に近い空気流が基板に衝突するものと考えられる。そのため、ピッチが小さくなるほど基板の最大ヌセルト数は熱流束比の影響を大きく受けるようになるものと考えられる。

(3) 局所ヌセルト数の分布と熱流束比との関係

基板に再付着点がある場合の最大点より後方の局所ヌセルト数および最大点より前方の局所ヌセルト数を

図 5 $Nu_{b,max}/\tilde{Nu}_{b,max}$ と q_p/q_b との関係

それぞれ、 $Nu_x/Nu_{b,max}$ と x'/h_p および $Nu_x/Nu_{b,max}$ と x''/x_{max} との関係で整理した結果の一例を図 6, 7 に示す。また、再付着点がない場合の局所ヌセルト数を $Nu_x/Nu_{b,max}$ と $x''/(p-w_p)$ との関係で整理した結果の一例を図 8 に示す。基板の局所ヌセルト数を図 6~8 のように整理すると、その分布は q_p/q_b を変えても同じである。

3.2 突起表面の局所熱伝達率と熱流束比との関係

突起表面の局所ヌセルト数を $Nu_x/Nu_{p,max}$ と x/h_p

表 1 $Nu_{b,max}/\tilde{Nu}_{b,max}$ の実験式

p/h_p	h_p/De	$Nu_{b,max}/\tilde{Nu}_{b,max}$
60	0.0579, 0.0324	$-0.0274 \cdot (q_p/q_b) + 1.05$
20	0.174, 0.0579 0.0324	$-0.0319 \cdot (q_p/q_b) + 1.06$
10	0.0579, 0.0324	$-0.0423 \cdot (q_p/q_b) + 1.09$
5	0.0579, 0.0324	$-0.0774 \cdot (q_p/q_b) + 1.16$
2.5	0.174, 0.0579	$-0.127 \cdot (q_p/q_b) + 1.26$

図 6 再付着点がある場合の最大点より後方の局所ヌセルト数

図 7 再付着点がある場合の最大点より前方の局所ヌセルト数

および x/w_p との関係で整理した結果の一例を図 9 に示す。 $Nu_{p,max}$ は突起前面における最大ヌセルト数である。突起前面の局所ヌセルト数は上縁で最大となると考えられるので、その値は局所ヌセルト数分布の測定結果から外挿によって求めた。 x は突起前面では下端から図った距離、上面では前縁から図った距離、背面では上端から図った距離である。 Nu_x の値そのものは q_p/q_b の増加とともに大きくなるが、 $Nu_x/Nu_{p,max}$ の分布はほとんど変わらない。

図 10 に、突起表面の局所ヌセルト数の一例である突起前面の最大ヌセルト数 $Nu_{p,max}$ と Re との関係を q_p/q_b をパラメータとして示す。 $Nu_{p,max}$ の値は q_p/q_b の増加とともに大きくなるが、いずれの場合も Re のべき乗に比例する関係で整理できる。

Re の指数 (n) は q_p/q_b が大きいほど小さい。

$Nu_{p,max}$ を $Nu_{p,max}/\tilde{Nu}_{p,max}$ と q_p/q_b と関係で整理した結果の一例を図 11 に示す。 $\tilde{Nu}_{p,max}$ は q_p/q_b が 2 の時の $Nu_{p,max}$ である。本実験の p/h_p の範囲 ($2.5 \leq p/h_p \leq 60$) では、 $Nu_{p,max}/\tilde{Nu}_{p,max}$ は p/h_p に依存しない同じ関係で整理できる。しかし、異なった Re に対しては別の関係で整理する必要がある。突起の高さを変えた場合の結果を図 12 に示す。突起の高さを変えても、 $Nu_{p,max}/\tilde{Nu}_{p,max}$ と q_p/q_b との関係は変わらないと言える。ただ、 Re が高く、しかも突起の高さが高い場合の $Nu_{p,max}$ は q_p/q_b の値を変えてもそれほど大きく変化せず、 h_p/De が比較的小さい場合とは異なる関係となっている。

q_p/q_b の値が約 1 から 2.5 の範囲では、

$$Nu_{p,max}/\tilde{Nu}_{p,max} = a \times (q_p/q_b) + b$$

(a, b は Re によって異なる定数) (5)

の関係で整理できる。 a の値は Re が小さいほど大きい。

図 8 再付着点がない場合の局所ヌセルト数

突起表面のヌセルト数が、基板のヌセルト数とは反対に、熱流束比の増加とともに大きくなるのは、円管内流れの熱伝達において円管の熱流束を流れ方向に急激に増加させると、熱伝達率が大きくなるのと同様な理由によるものであると考えられる。すなわち、突起表面の熱流束を増加させると突起の表面温度はある程度上昇するが、式(2)において熱流束の増加分に相当するだけ $(T_w - T_b)$ (この場合は、 T_w) が増加しない。これは、突起の前面・上面・背面に沿って流れる流れが、突起部での熱流束(加熱条件)に対応した一種の温度助走区間内にあるからであると考えられる。そのた

め、突起部の熱流束を増加しても、壁温はその割には高くなる(例えば、熱流束を2倍にしても、 $(T_w - T_b)$ は2倍にはならない)。したがって、突起表面の熱流束を増加させるほど $Nu_{p,max}$ も大きくなるものと考えられる。また、図11と図12において $Nu_{p,max}/\bar{Nu}_{p,max}$ と q_p/q_b との関係が、 p/h_p , h_p/De によらず同じなのは、突起前後に生じる渦の形等大まかな流れのパターンが同じであることなど関係があるものと考えられるが(少なくとも、 $p/h_p \geq 10$ では)、この点については(p/h_p が小さい場合も同じ関係で整理できる理由も含め)今後さらに検討する必要がある。

4. む す び

平行平板流路の下壁に正方形断面をした二次元状の突起を多数個取付けた突起付き伝熱面の局所熱伝達率と q_p/q_b (突起表面の熱流束と基板表面の熱流束との

図9 突起の局所ヌセルト数の q_p/q_b による変化

図10 突起前面の最大局所ヌセルト数の q_p/q_b による変化

図11 $Nu_{p,max}/\bar{Nu}_{p,max}$ と q_p/q_b との関係

図12 $Nu_{p,max}/\bar{Nu}_{p,max}$ と q_p/q_b との関係

比)との関係を実験によって調べた。その結果以下のことがわかった。

(1) 基板の局所ヌセルト数を $Nu_x/Nu_{b,\max}$ で整理すると、その分布・値は q_p/q_b を変えても同じである。また、突起の局所ヌセルト数を $Nu_x/Nu_{p,\max}$ で整理すると、その分布・値は q_p/q_b を変えてもほとんど変わらない。

(2) 基板の局所ヌセルト数は q_p/q_b の増加とともに減少し、最大値は式(4)で整理される。その他の場所の局所ヌセルト数も式(4)と同様に整理されると考えられる。

(3) 基板に再付着点がある場合の基板の局所ヌセルト数は、 q_p/q_b を 0.5 から 2.5 まで変えても高々 10 % 程度しか減少しない。

(4) 突起の局所ヌセルト数は q_p/q_b の増加とともに

に大きくなり、突起前面の最大局所ヌセルト数は式(4)で整理される。

その他の場所の局所ヌセルト数も式(5)と同様に整理されると考えられる。

本研究に当たり実験装置の製作などに協力いただいた日本原子力研究所の大内光男氏、富士電気(株)の長野皓二郎氏、北川甫氏に厚く感謝の意を表する。

文 献

- (1) 菱田, 第 23 回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (1986-5), 334.
- (2) Edwards, F. J. and Sheriff, N., *Int. Dev. Heat Transfer*, Part 2 (1961), 415.
- (3) Kattchee, N. and Mackewicz, W. V., *Nucl. Sci. Eng.*, 16 (1963), 31.
- (4) 狩野・ほか 2 名, 機論, 50-449, B (1984), 257.
- (5) 土方・ほか 2 名, 機論, 50-458, B (1984), 2555.