

拡大伝熱面の伝熱流動特性に関する研究

岡本芳三*, 神永文人*, 益子一郎*

(昭和63年 8月23日受理)

Heat Transfer and Fluid Flow Performance of Extended Surface

Yoshizo OKAMOTO*, Fumito KAMINAGA*, Ichiro MASHIKO*

Abstract — An extended surface has been used for promoting heat transfer of heat exchangers and nuclear reactor. Enhanced heat transfer surfaces, such as fin, roughend and detached promoter, play an important role of improving performance of energy convertors under critical environments. The paper shows fluid flow and heat transfer characteristics of a parallel channels wall with squared rids. Study of flow visualization and convective heat transfer around the rids had been undertaken.

1. 序 論

原子炉, 化学反応プラントおよび推進機関などの高温伝熱システムにおける高温化の達成とその維持のために, 極限条件において伝熱を意のごとく促進制御する特殊な熱伝達技法を使用する必要がある。またプラントの性能向上と目的用途の多様化に伴い, 熱効率および出力の向上を目標として, 極限条件での伝熱制御技術の果す役割は重要となっている。その技術は伝熱促進と伝熱制御とに分類され数多くの手法が適用されており, これらの伝熱促進技術の1つに拡大伝熱面 (extended heatsurface) がある^{1),2)}。

拡大伝熱面は伝熱面の一次基面に, 二次的な拡大面を取り付け, 伝熱面積の増加と拡大面のまわりの渦流による熱伝達促進の効果を利用して, 伝熱量の改善をはかろうとするものであり, 拡大面の形状により, フィン, 突起および粗面などに分類される。

この中で, 流路の高さに比して拡大面の大きさが数分の一近くをしめ, 拡大面の形状が流路内の流れそのものに影響を与えるような突起付伝熱面が, 原子炉の燃料棒や熱交換器の伝熱機器などに利用されており, その研究は数多く行われている。例えば, 突起の形状, ピッチ, レイノルズ数, 熱流束などの因子によって熱伝達分布がどのように変化するかを調べたものがあるが, 主流の流れに影響を与える, 大型の突起面であり

かつまた流路の上下の面に突起が取付けられた伝熱面の伝熱流動はこれまであまり行われていない。

そこで本研究では, 平行平板流路の両面に流路高さの1/3の高さをもつ正方形断面をした二次元突起を取付け, ピッチ, 位相のずれ, レイノルズ数などと熱伝達率との関係を調べた。また, 突起まわりの流れの可視化を行うため, 伝熱実験と同様な形状の流路模型を作成し, これを回流水槽に取り付け, 試験を行なった。トレーサーとしてはアルミ粒子を用いた表面浮遊法により可視化を行ない突起面の後流に発生する渦流れを観察した。さらに, ステンレス箔にアクリル製の突起を取り付け, 直接通電を行ない, 箔の温度分布を求め伝熱実験を行なった。

2. 突起面の伝熱流動の機構と研究の現状

まず, 伝熱促進法として拡大伝熱面の機能について簡単に述べる。

突起の付いてない一次伝熱面からの伝熱量 Q_0 (kcal/h) は近似的に次式で示される。

$$Q_0 = (\alpha_c + \alpha_w)_0 A_0 (T_w - T_g) \quad (2-1)$$

ここで α_c : 対流熱伝達率 (kcal/m²h°C)
 α_w : ふく射熱伝達率 (//)
 $(\alpha_c + \alpha_w)_0$: 表面の熱伝達率 (//)

*茨城大学工学部機械工学科(日立市中成沢町)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

A_o : 伝熱面積 (m²)

T_w : 一次伝熱面温度 (°C)

T_g : ガス温度 (°C)

次に、突起付伝熱面からの伝熱量 Q_1 (kcal/h)は近似的に次式で示される。

$$Q_1 = (\alpha_c + \alpha_w)(A_w + \eta A_f)(T_w - T_g) \quad (2-2)$$

ここで A_w : 突起のない部分の一次伝熱面積 (m²)

A_f : 突起表面積 (m²)

η : 突起効率

突起を付けることによる伝熱量の増加を突起のない場合の伝熱量との比、つまり突起有効度 ξ で表すと

$$\xi = \frac{Q_1}{Q_c} \frac{(\alpha_c + \alpha_w)}{(\alpha_c + \alpha_w)_0} \left(\frac{A_w}{A_o} + \eta \frac{A_f}{A_o} \right) \quad (2-3)$$

となる。この突起有効度 ξ が1よりも大きいほど、突起を付けることにより伝熱量を大幅に増加させることができる³⁾。

突起付伝熱面の熱伝達に関する従来の研究と今回の研究をTable 2-1に示す。

Table 2-1 Research Reports on Heat Transfer of the extended surface^{7),8),9),10)}

研究者	突起の形状	流路の形状	h/De	P/h	Re	加熱条件
F. J. Edwards H. Sheriff	円形	平行平板流路	0.017	4, 16, 24 32, 64, 96	2.22x10 ³ ~ 2.37x10 ⁵	等熱流束壁
N. Kattchee W. V. Mackiewicz	正方形	2重管	0.167~ 0.280 (4種)	7.7, 9.7 14.1, 20	6x10 ⁴	等温壁
F. J. Edwards	円形	2重管	0.0155	16, 32, 64	1.7x10 ⁵ ~ 1.2x10 ⁶	等熱流束壁
D. Wilkie	正方形	2重管	—	7.2, 15	1.9x10 ⁵	等温壁
F. Williams J. Watts	正方形 面取り矩形 の歯状	平行平板流路	0.072	3.0, 7.0	1.3x10 ⁵	等温壁
C. K. Rao J. J. C. Picot	円形	2重管	0.024 0.033	5, 7, 10	6.0x10 ⁴ ~ 1.2x10 ⁵	等熱流束壁
F. P. Berger K.-F.-L. Hau	正方形	円管	0.0364	10	1.0x10 ⁴ ~ 2.0x10 ⁵	等温壁
E. M. Sparrow W. Q. Tao	円形	平行平板流路	0.0472 0.0883	9.15, 18.3 36.6	1.0x10 ⁴ ~ 4.5x10 ⁴	等温壁
棚沢, 他	平板	平行平板流路	0.033 0.036 0.05 0.079 0.087 0.116	9.9, 13.5 14.4, 19.4 31.6, 35	1.0x10 ⁴ ~ 7.0x10 ⁴	等熱流束壁
渡田 誠 (原研)	正方形	平行平板流路	0.1734 0.0578 0.0324	60, 20 10, 5 2.5	3.0x10 ³ ~ 1.0x10 ⁵	等熱流束壁
今回の実験	正方形	平行平板流路	0.167	4, 8, 12	1.5x10 ⁴ ~ 6.0x10 ⁴	片面加熱

今回の研究は平行平板流路の両面に二次元突起がついていること、および突起の高さと代表寸法の比 h/De が0.2程度の比較的大きい値のデータである。

3. 実験装置と方法

3.1 プロモーターのまわりの流れの可視化に関する実験

平行平板流路におかれた正方形の突起の回りに発生するはく離渦の挙動を調べるために、流れの可視化実験を行なった。流れを可視化する手法としては懸濁、水素気泡、表面浮遊、注入流脈などの手法が考えられるが、流速範囲および実験の容易さを考慮して、回流水槽を用いた表面浮遊法を採用して実験を行なった。

すなわち、60mm幅の流路の両側に高さ20mmの正方形突起を一定間隔Pで取り付ける。すなわち、両側に取付けた突起の位相差FがF=0の場合には、流路の最小幅は20mmとなり、流速は突起のある部分で最高約3倍に加速されることになる。

表面浮遊法は、二次元水槽中の流体流れの表面にトレーサ物質を浮遊させて、二次元物体まわり及び流路内の流跡を可視化する方法である。他の注入トレーサ法と比較して、注入や観測の方法がきわめて簡便で容易に行えることがあげられる。逆に短所としては、壁面近くにおいて表面張力やせん断力の影響を受ける、突起物の前側で水面が盛り上がり後ろ側で下がる跳水現象を起こす、流体表面の波打ち現象が生ずる。また表面の流れが水深方向の影響を受ける、などの欠点があげられる。流速を高くするとこれらの現象が起こるので流速は20cm/s以内が望ましい。

トレーサ物質としては次のような性質が求められる。表面に浮遊しやすい、液体との比重が大きくない、粒度が均一、液体表面で個々の粒子が均一に分散して粒子間での凝集および沈降作用が起こりにくい、入射光に対し反射性が高く撮影しやすい、などを考慮してアルミ粉を表面に浮遊させて実験を行なった⁶⁾。

流れの可視化の実験装置をFig. 3-1に示す。

回流水槽は、水槽、循環ポンプ、流量を調節するバルブ、流量計よりなる。実験に使用した水槽は幅100mm、高さ55mmの矩形流路であり、試験部は伝熱実験との比較のため同一寸法の幅60mmの平行平板流路となっている。また、突起は20mm×20mmの正方形断面をしており、突起の配置は伝熱実験同様にFig. 3-2に示すとおり9パターンで実験を行った。

流体には水を使用し、ポンプで循環させ流量を10ℓ/min、16ℓ/min、22ℓ/min、28ℓ/minの4段階に変え定常状態で実験を行った。

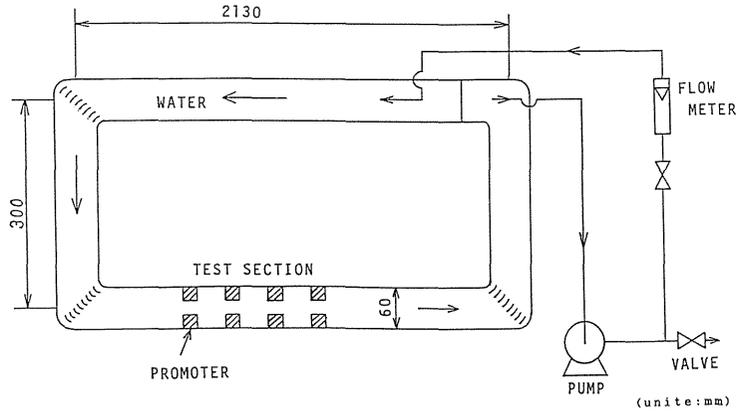


Fig. 3-1 Open water Channel Loop

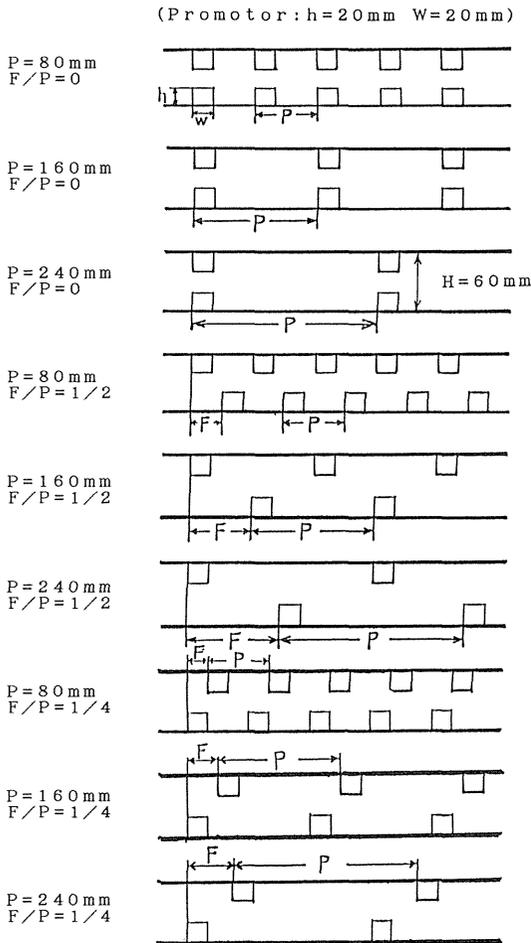


Fig. 3-2 Test Pattern of Promoters

トレーサ物質には、水表面で拡散しやすく沈降しにくい $10\mu\text{m}$ のうろこ状アルミ粉を使用した。

実験は回流水槽中のポンプの吐出側の流速を変化させて $3\text{cm/s}\sim 13\text{cm/s}$ の範囲で、写真用ライト(500W)を斜上方から向合ように照明用に2個使用し、試験区間真上にカメラをおいて写真とビデオ撮影による観測を行った。

トレーサの注入は液体表面に散布して行い、ポンプには流れ込まないようにし、水槽の表面を循環させた。表面流速は試験部の直前に発泡スチロールを浮かべて、一定距離流れる時間を測定して求めた。

今回のレイノルズ数は伝熱実験の $1/3$ 程度の下記に示す範囲の値である。

実験条件を次に示す。

- 流路の幅 $H=60\text{mm}$
- 流路の代表直径 $De=120\text{mm}$
- レイノルズ数 $Re=4.5\times 10^3\sim 1.5\times 10^4$
- ピッチと突起高さの比 $P/h=4, 8, 12$
- 位相のずれとピッチの比 $E/P=0, 1/4, 1/2$

3.2 伝熱実験

突起物を流路下面に取り付けた実験は数多く行われているが、流路内に主流に影響を与える程度の大きさの突起が流路両面に付いた実験はあまり行われていない。そこで本実験では、平行平板流路を使用し、その試験部の上下両面に正方形断面の二次元突起を取り付け、熱伝達の分布を求めた。ただし、今回の突起はアクリル製のため熱伝導率が非常に小さいので突起よりの伝熱はあまり期待できない。

本実験に使用した吹出し型風洞装置をFig. 3-3に示

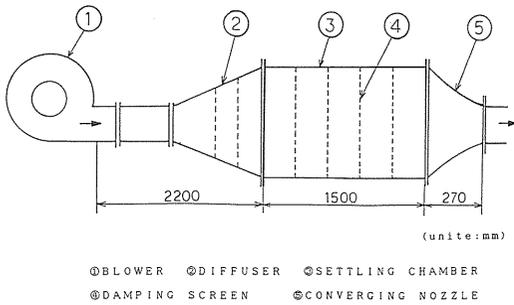


Fig. 3-3 Wind Tunnel

す。可変速電動機に直結された送風機より送られる空気は、拡散筒、整流筒を通過した後、縮流ノズルにより、収縮比を12:1に絞られる。各部の長さは、拡散筒2200mm、整流筒1500mm、縮流ノズル270mm、であり、拡散筒、整流筒内には整流の働きをする金網が挿入されている。そのため100mm×300mmの矩形断面を持つ縮流ノズル出口では、一様な流速分布の流れを得られるようになっている。

送風機は三相整流子電動機によって回転数125~2500rpmの範囲で変化させることができる。

本実験で使用した流路及び伝熱装置の全体図をFig. 3-4に示す。

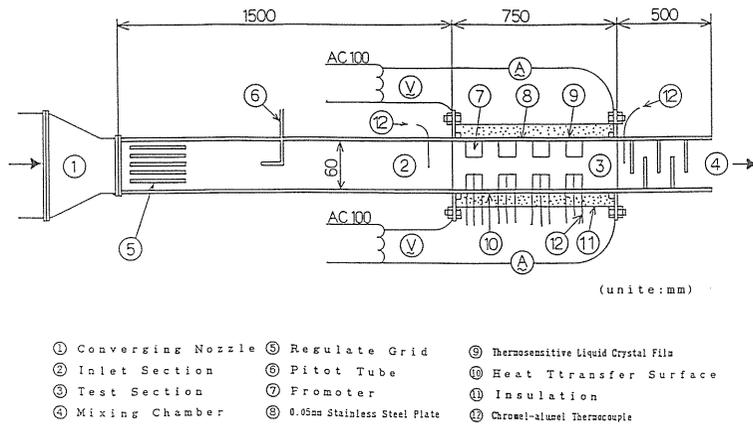


Fig. 3-4 Heat Transfer Test Section

流路は、高さ60mm×幅230mm($De=120mm$)の平行平板流路(厚さ10mmの亚克力製)で、縮流部①、助走区間②、試験区間③、混合区間④からなり、助走区間の前部には整流格子⑤が取り付けられ、Fig. 3-3の風洞につながる。

試験区間を構成する流路上面には、幅270mm、長さ750mm、厚さ10mmの亚克力板の内側に伝熱面となる厚さ50 μ mステンレス箔を貼り、亚克力板とステンレス箔の間には感温液晶膜を貼りつけたものを用いた。また、流路下面には亚克力板と同寸法のベークライト板の上に厚さ50 μ mのステンレス箔を貼り、ベークライト板とステンレス箔の間にCA熱電対34本⑫を埋め込み付けた。熱電対の取り付け箇所はFig. 3-5に示す。突起のピッチを考慮40, 20, 10mmのピッチで取り付けられている。上面と下面の電気系統は独立しており、それぞれのステンレス箔の両端を真鍮電極にスポ

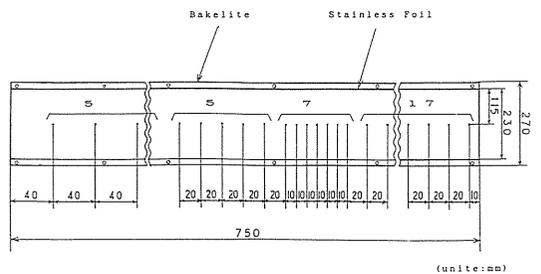


Fig. 3-5 Location of Thermocouple

ット溶接し、交流電源に接続して入力制御を行う。最大印加電圧は2.9V、37Aであった。ステンレス箔の電気抵抗は $4.7 \times 10^{-2} \Omega$ である。ベークライト板とステンレス箔は両面接着テープで取り付けられており、ステンレス箔に直接通電して加熱した。ステンレス箔の加熱温度は約50 $^{\circ}$ Cであり、外側への放熱は通常1%~3.5%で

ある。また、試験区間は厚さ約50mmの発泡スチロール板①で断熱した。

突起部は流れの可視化実験同様20mm×20mmの正方形断面をもつ角棒(アクリル製)を用い、下側の突起の上面にもCA熱電対がついている。アクリルの熱伝導率は0.18(kcal/mh°C)でありステンレスの17(kcal/mh°C)の1/94であり、放熱を期待しない状態での伝熱特性を求めている。温度測定にはサーモダック(多点式温度測定器)を使用した。

その他には、助走区間の整流部の直後に流速を測定するためのピトー管、試験区間直前、混合区間直前にそれぞれ入口ガス温度、加熱後のガス温度を測定するCA熱電対がついている。

常温、常圧の空気を送風機で試験部に供給して実験を行った。

実験条件を次に示す。

- 流路の代表直径 De=120mm
- レイノルズ数 Re=1.5×10⁴~6.0×10⁴
- ピッチと突起高の比 P/h=4, 8, 12
- 位相のずれ F/P=0, 1/4, 1/2
- 加熱条件 下側の面のみ加熱

以上の条件でFig. 3-2に示すような9パターンについて流速を4段階に変え、温度が定常(40分~60分)になってから、サーモダック(多点式温度測定器)で測定した。

4. 流れの可視化実験結果

3.1に述べたように両面に正方形の突起を一定間隔P/hで取り付けけた場合の、レイノルズ数Re, 突起の位相とピッチの比F/Pをそれぞれかえた場合の突起まわりの流れを可視化した。

Table 4-1に試験条件を示し、Fig. 4-1~4-9に各形状における流れの模様を示す。

突起のまわりの渦の流れは非常に複雑であり、主要な挙動を列記すると次の様になる。

1) F/P=0の上下に相対する突起がある場合、突起の入口では一様な縮流加速流れとなつて、突起の出口では、拡大するコアンダ流れの影響をうけ、突起間で時間的にも流れの方向を変える蛇向流となる。また突起内の渦流は主流との間の剪断流れによりエネルギーを変換しあい、発生消滅を繰返す不安定な流れである。

Table 4-1 Test Pattern of Square-riked Cannel (W= h =20mm H=60mm De=120mm)

Test No.	Pitch P (mm)	P/H	Phase/Pitch F/P	Velocity V (cm/s)	Re	Fig.
1-1	80	4	0	3.6	4557	4-1 a
1-2				10.0	12660	4-1 b
2-1	160	8	0	3.6	4557	4-2 a
2-2				6.7	8482	4-2 b
3-1	240	12	0	3.7	4684	4-3 a
3-2				6.3	7912	4-3 b
4-1	80	4	0.5	4.2	5317	4-4 a
4-2				8.0	10128	4-4 b
5-1	160	8	0.5	4.9	6203	4-5 a
5-2				8.7	11014	4-5 b
6-1	240	12	0.5	5.7	7216	4-6 a
6-2				12.5	15824	4-6 b
7-1	80	4	0.25	4.7	5950	4-7 a
7-2				10.0	12660	4-7 b
8-1	160	8	0.25	4.0	5064	4-8 a
8-2				7.3	9368	4-8 b
9-1	240	12	0.25	5.4	6386	4-9 a
9-2				11.1	14052	4-9 b

a
Re=4557

b
Re=12660

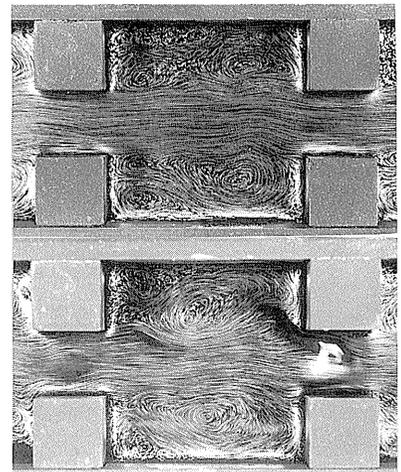


Fig. 4-1 Flow Pattern around Promoter (P=80, F/P=0)

- 2) 突起の間の区画内で突起上面の剪断流により、これにかみ合う渦流が生じているが、その形状は規則性がなく、既にある渦が新しく発生する渦に巻き込まれ、主流はその過程で、上下に移動する流れとなり、区画内の流体を一部吐き出すなどの作用を行なう。
- 3) F/P=0の場合、Fig.4-6~4-9におけるように、上下の渦の形状は対称的でなく、F/P≠0の場合より渦の形状は時々刻々変化する不安定な流れである。但し、主流のパターンはRe数に依存しない。

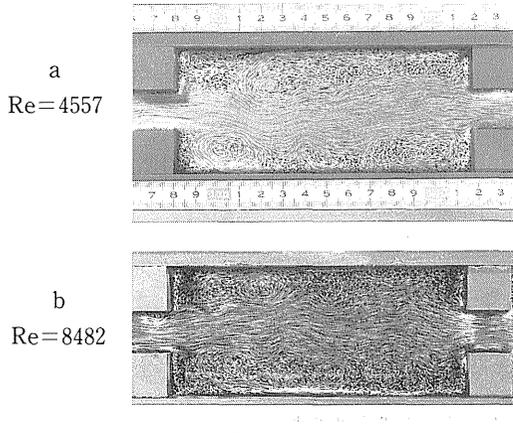


Fig. 4-2 Flow Pattern around Promoter (P=160, F/P=0)

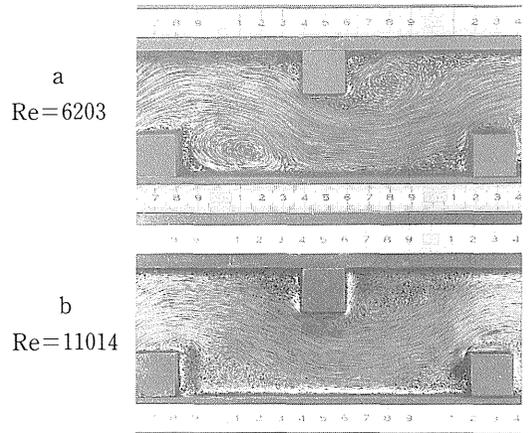


Fig. 4-5 Flow Pattern around Promoter (P=160, F/P=0.5)

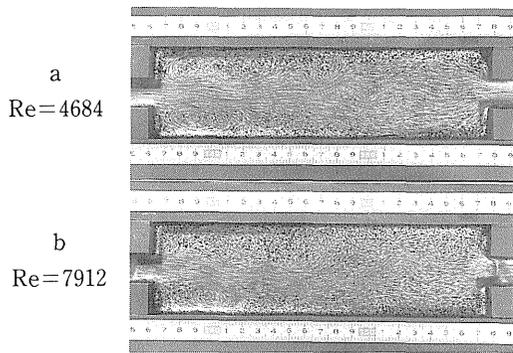


Fig. 4-3 Flow Pattern around Promoter (P=240, F/P=0)

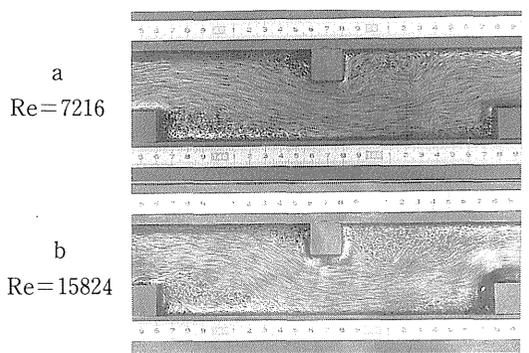


Fig. 4-6 Flow Pattern around Promoter (P=240, F/P=0.5)

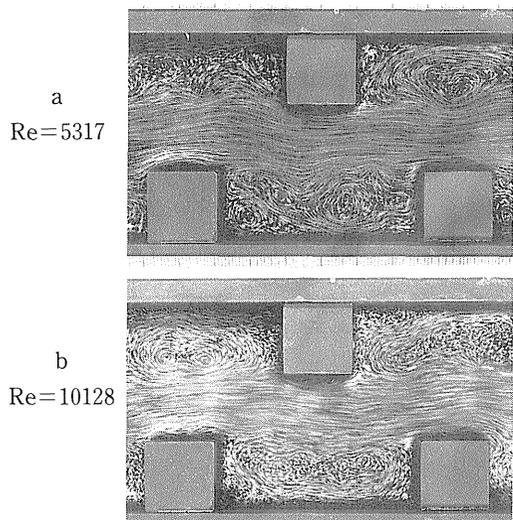


Fig. 4-4 Flow Pattern around Promoter (P=80, F/P=0.5)

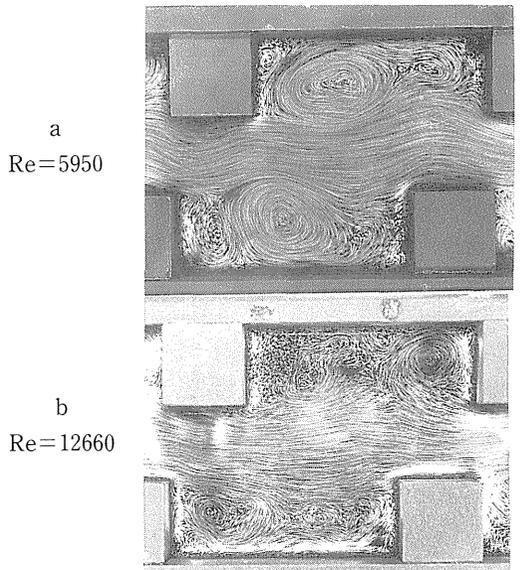


Fig. 4-7 Flow Pattern around Promoter (P=80, F/P=0.25)

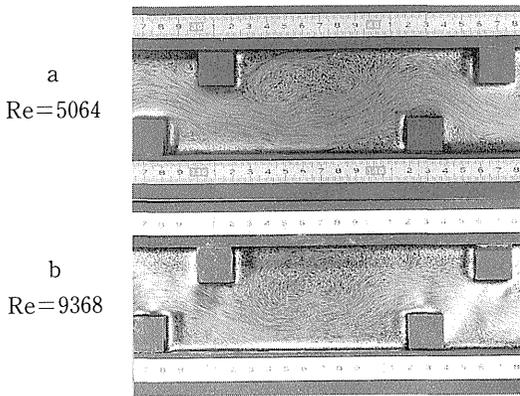


Fig. 4-8 Flow Pattern around Promoter ($P=120, F/P=0.25$)

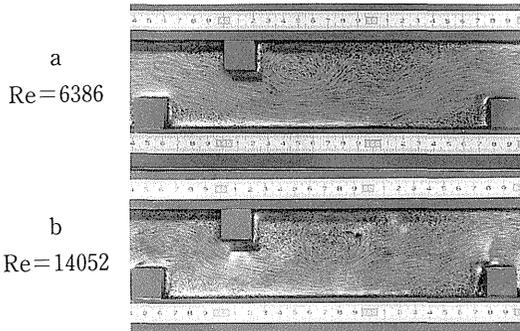


Fig. 4-9 Flow Pattern around Promoter ($P=240, F/P=0.25$)

- 4) $F/P=0$ で, $P/h=4$ の場合では2つのかみ合う渦であり, 区画内はほぼ主流の $1/3 \sim 1/4$ の流速で回転している。
- 5) Fig. 4-7, 4-8の $F/P=0$ で $P/h=8, 12$ の場合, コア流れにより, 傾きをもって主流は突起より流出し, 主流が突起につく程度まで蛇向し, 上下に2~3ヶのかみ合う渦が発生するが, 時々刻々変る主流の蛇向により, 渦の形は大きく変化する, 規則性をもっていない。
- 6) Fig. 4-8の $F/P=0, P/h=12$ の場合, 主流は突起のある2 cm幅より6 cmの流路に拡大するために, 主流は $x/h=10$ の位置で, 流路全幅をしめる程大きく広がり, この部分の渦は消滅しており, 次の突起の上流で再び, 突起入口に向い縮流を始める。
- 7) $F/P=1/2$ の場合, 主流は突起を乗り越えて, 反対側の壁に接して, 再び反対側の突起により方向を変える蛇向する流れであり, 突起の前後に, 1~3個

のかみ合う渦が発生している。主流は $F/P=0$ の場合と比較して比較的安定している。

- 8) $F/P=1/4$ の場合, $P/h=4$ では, 主流はほぼ直線的に流れるが, $P/h=8, 12$ では上下の突起の後流で大きく流れを変え, 一方の流路に打ち当たり壁に沿って流れるため, 壁に当たった面での流れは主流に接した流れとなる。 $P/h=8$ では渦流は下流の突起の上流側を除き発生していないが, 反対側には突起の裏側で主流の $2/3$, 突起の高さの1.5倍程度の大きな渦と後流に並ぶ一列の渦が生じ, 主流は下流側で接触していない。しかし, $P/h=12$ では後流の突起の反対側で主流は接触している。突起の裏側で発生する渦は1~3ヶあり時間により安定していないことは $F/P=1/2$ の場合と同一である。

5. 伝熱実験の結果

ステンレス箔加熱面に取り付けられた熱電対により表面の温度分布を求め, プロモーターのまわりの渦流による伝熱の促進効果をしらべた。

5.1 表面の温度分布

Fig. 5-1~5-3には伝熱面の温度分布をしめす。BCDE, GHIJは突起部の温度であり, アクリルの熱伝導率が低いいため, 突起部の放熱量はほぼ無視でき, 突起効率は十分に小さい。突起間の温度はいずれも後流に向って減少し, 後流の突起上面で増加している。

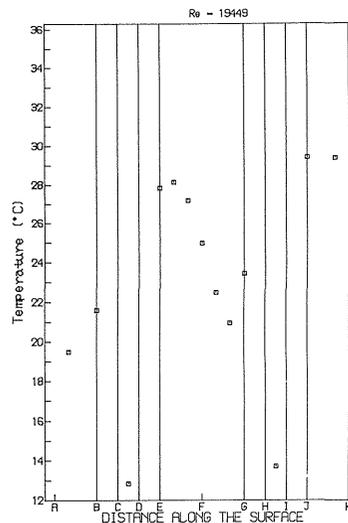


Fig. 5-1 Temperature Distribution ($P=80, F/P=0.5$)

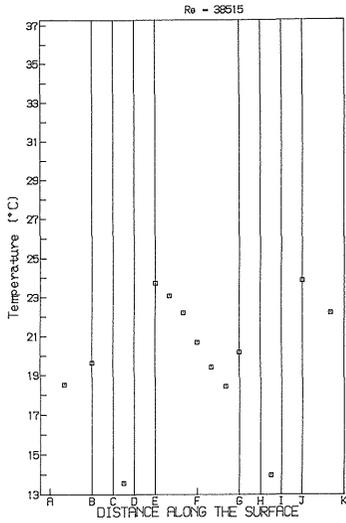


Fig. 5-2 Temperature Distribution (P=80, F/P=0.25)

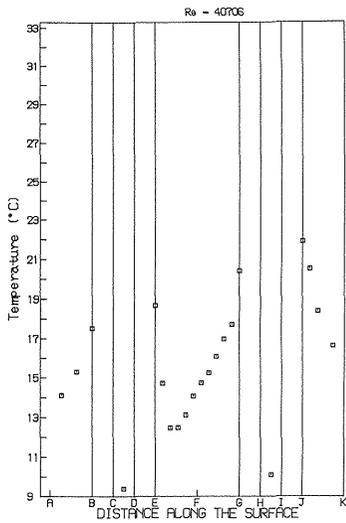


Fig. 5-3 Temperature Distribution (P=240, F/P=0)

5.2 表面の熱伝達率の分布

Fig. 5-4~5-6は5.1で求めた温度分布をもとに、表面の熱伝達率を求めた結果をしめす。いずれも、突起の後流渦の岐点および主流の着地点の位置で最大値をもつ山形の分布をもつことを特色としている。

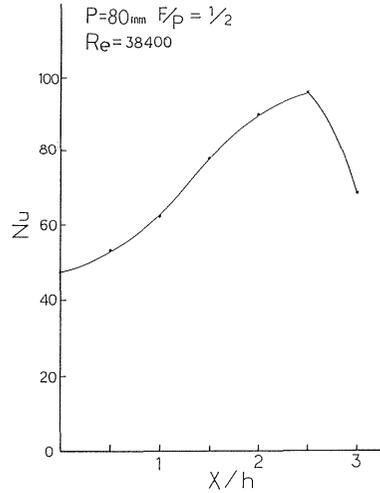


Fig. 5-4 Distribution of Local heat Transfer Coefficient (P=80, F/P=0.5)

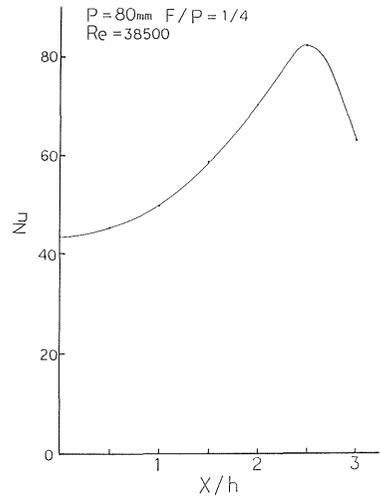


Fig. 5-5 Distribution of Local heat Transfer Coefficient (P=80, F/P=0.25)

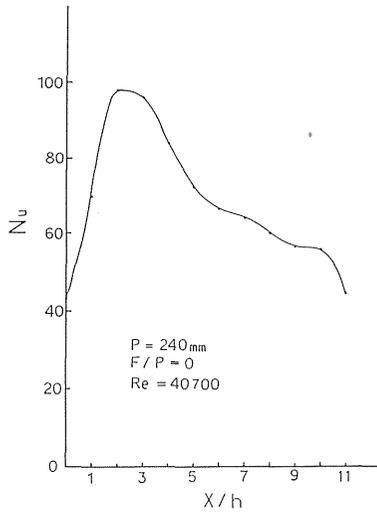


Fig. 5-6 Distribution of Local heat Transfer Coefficient ($P=240, F/P=0$)

5.3 平均ヌセルト数 \overline{Nu} とレイノルズ数 Re の関係

Fig. 5-7~5-9にピッチ P が80, 160, 240の場合の \overline{Nu} 数と Re 数の関係を示す。

\overline{Nu} 数は平行流路に対してほぼ3~4倍の値を示し、 Re 数に対する指数は0.8乗であり、平行流路の場合に等しい。突起の放熱を期待しない場合でも、渦流の攪拌効果、すなわち、ターブレンスプロモーター効果により、3~4倍近く増加し、主流のプロモーターによる絞り流速の増加2~3倍の値を上回る伝熱促進効果を期待できることを示している。

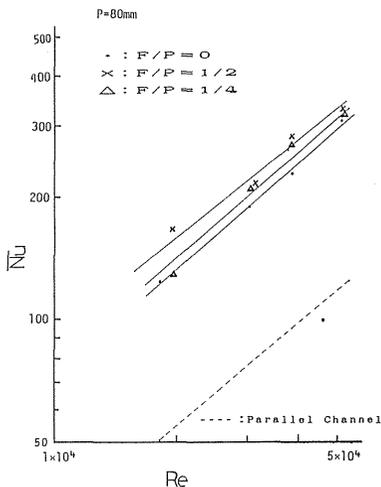


Fig. 5-7 The relation between $Re-\overline{Nu}$ ($P=80$)

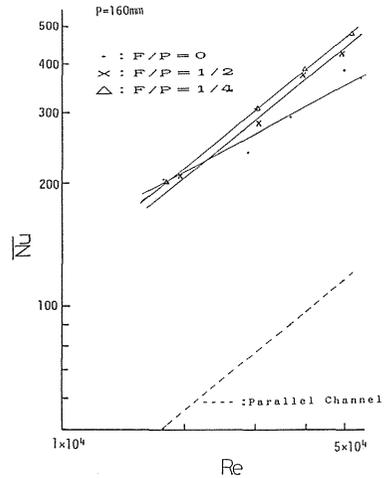


Fig. 5-8 The relation between $Re-\overline{Nu}$ ($P=160$)

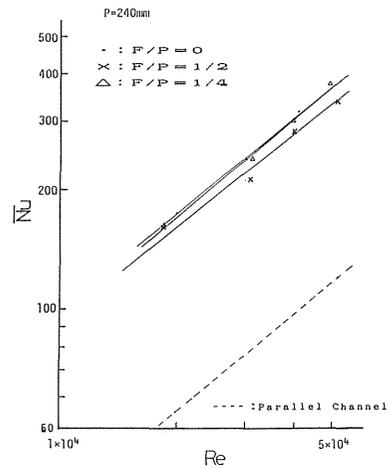


Fig. 5-9 The relation between $Re-\overline{Nu}$ ($P=240$)

突起のピッチ P と突起幅 w との比は4, 8, 12の割合で変化させて実験を行なっているが、 $P/w=8$ すなわち $P=160$ の場合 \overline{Nu} 数は最も高い値を示す。

上下の突起の位相 F を変えた場合 $F/P=1/4$ の場合が、 \overline{Nu} 数が最も高い値を示している。

6. 結 論

平行流路内に、流路高さ60mmに対して、上下の面に20mm幅の突起を取り付け、流れの可視化と熱伝達特性を調べた結果を得た。

1) 突起物のまわりおよび後流に発生する渦により、突起間区画内の流れは、不安定であり、渦の発生消

減が、主流の流れそのものに影響を与えると共に、区画内と主流間の流体の混合に大きな影響を及ぼす。

2) 突起上部に発生する強い剪断流れにより、突起間に2~3個のかみ合う渦流れが生じ、主流に対して、 $1/3 \sim 1/4$ の速度で回転しており、上下の渦は非対称で、主流に影響を与えながら発生消滅をくりかえしている。

3) 突起物による伝熱面の伝達量は突起のない平滑平行流路値の3~4倍の値を示す。突起の最大絞りの流速と突起のない平行流路の流速の比は3倍であり、その値を上回る伝熱促進効果が得られた。また、位相差 $F/P = 1/4$ の場合が、熱伝達率の値は最も大きくなることを確認した。

4) 表面の熱伝達率は、渦の岐点および主流の着地点で最大値をもつ山形の分布を示す。

5) 今後は、突起のピッチ、位相差による伝熱流特性の詳細な解析、突起の回りの温度分布の赤外線放射計による可視化および突起物の熱流分布の測定と解析を進める予定である。

最後に、本研究に協力いただいた、62年度卒研生の阿部嘉則、安藤洋一、渡辺斉の諸君に感謝の意を表する次第である。

記号表

h	: 突起の高さ (mm)
w	: 突起の幅 (mm)
De	: 流路の代表長さ (mm)
P	: 突起のピッチ (mm)
F	: 上下の突起のずれ (mm)
$\alpha(X, Y)$: 対流熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)
λ	: 熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{mh}^\circ\text{C}$)
T_g	: ガス温度 ($^\circ\text{C}$)
q_0	: 単位時間単位面積あたりに流入する熱流束 ($\text{kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$)
ϕ	: 突起効率
q_r	: 突起根元面の伝熱量 (kcal/h)
q_f	: 突起部伝熱量 (kcal/h)
q	: $\lambda = \infty$ のときの突起部伝熱量 (kcal/h)
Q_r	: 突起根元面の無次元伝熱量
Q_f	: 突起部無次元伝熱量
Q	: $\lambda = \infty$ のときの突起部無次元伝熱量

d	: 熱流束無次元量
$m, h(X, Y)$: 対流無次元量
$\theta(X, Y), \theta_g$: 無次元温度
X, Y, a, b, b_0, C	: 無次元長さ

参考文献

- 岡本芳三 “高温伝熱技術とその周辺(3)” 機械の研究第27巻第3号(1975)p488~492
- 岡本芳三 “高温伝熱技術とその周辺(5)” 機械の研究第27巻第9号(1975)p712~718
- 岡本芳三, 亀岡利行 “高温伝熱技術とその周辺(9)” 機械の研究第27巻第9号(1975)p1189~1193
- 岡本芳三 “厚みのあるフィン付伝熱面の解析(第一報 一枚のフィン付板および環の解析)” 日本機械学会論文集第31巻第224号(1965-4)p624~631
- 浅沼強 “流れの可視化ハンドブック” 朝倉出版(1977)
- 流れの可視化学会編集 “新版流れの可視化ハンドブック” 朝倉出版(1977)p198~203
- 菱田誠 “突起付伝熱面の熱伝達に関する実験的研究”(1984)
- 菱田誠 “突起付伝熱面の熱伝達” 第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集C113(1986-5)p334~336
- 菱田誠 “突起付伝熱面の熱伝達” 昭和61年度熱工学講演会論文集203(1986)p13~14
- 菱田誠 “突起付伝熱面の熱伝達” 第24回日本伝熱シンポジウム講演論文集(1987-5)
- 秋野詔夫, 鈴木邦彦, 佐野川好母, 岡本芳三 “感応液晶膜による流路内突起物周辺の温度分布と熱伝達の可視化” 流れの可視化第3巻第8号(1983-1)p40~46
- 菱田誠, 岡本芳三, 根小屋真一, 花輪寿一 “ワイヤ型タービュレンスプロモーターのまわりの熱伝達に及ぼす流れの影響” 第2回流れの可視化シンポジウム論文集w-16(1974-7)p115~120
- M. Hishida, K. Miya, M. Hashimoto, S. An, Y. Okamoto “Temperature Distribution and Thermal Stress of GCFR Roughened Fuel Elements” JAPAN ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE TOKAI RESEARCH ESTABLISHMENT
- T. Takizuka, K. Kikuchi, K. Miya, Y. Okamoto “Steady and Transient Temperature and

- Thermal Stress of GCFR Fuel Elements with Sharp and Blunt square ribs” OECD NEA SPECIALIST 1976
- 15) Y. Shiina, T. Takizuka, Y. Okamoto “ Flow around Turbulence Promoters in Parallel Channel (Flow Patterns around Cylinder-Type Turbulence Promoters)” Journal of Nuclear Science and Technology(1982-9)p720~728
- 16) Y. Shiina “Shedding Vortices around Various Types of Turbulence Promoters in Parallel Channel” Journal of Nuclear Science and Technology(1984-11)p836~843