



Title	返しバンド凸面における凍結挙動
Author(s)	田子, 真; Tago, Makoto; 福迫, 尚一郎 他
Citation	北海道大學工学部研究報告, 150, 57-68
Issue Date	1990-05-31
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42232
Type	departmental bulletin paper
File Information	150_57-68.pdf



返しバンド凸面における凍結挙動

田子 真 福迫尚一郎

(平成元年12月26日受理)

Freezing Heat-Transfer Characteristics from a Convex Surface of Return Bend with a Rectangular Cross Section

Makoto TAGO and Shoichiro FUKUSAKO

(Received December 26, 1989)

Abstract

The present study aims to investigate the freezing heat-transfer characteristics from the convex surface of the return bend which has a rectangular cross section with comparatively large aspect ratio. The experiments were carried out for six kinds of duct heights of 9, 17, 26, 50, 52, and 98 mm, with curvature radius of 45 and 159 mm under the condition that the convex surface was uniformly maintained less than the freezing temperature of water, while the concave surface was insulated. The experimental results indicate that the step-wise ice formation was observed on the cooled surface and also that the average freezing heat-transfer from a convex surface became more effective with decreasing duct height.

1. 緒 言

曲り管は各種工業分野において配管を始めとして様々な形態で利用されており、流体輸送や熱交換を目的とした機器の重要な一要素を担っている。このような背景から、従来より曲り管に関して数多くの研究¹⁻³⁾がなされている。しかしながら、曲り管内の流動および熱伝達挙動については、断面形状や曲率半径など多変数の条件下で3次元的な様相を呈しながら複雑に変化するため、個々の場合の解析結果ならびに実験データの集積はあるものの、それらの統一的知見を得るには到っていないのが現状である。

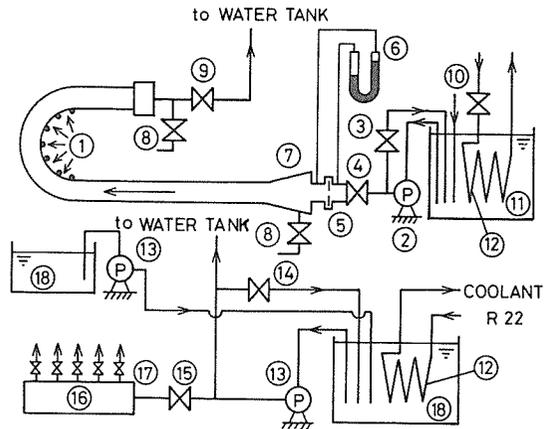
曲り管の一種であるバンド内流れについては、遠心力に基づく半径方向圧力勾配の不安定性に基づいて2次流れが発生することが知られており⁴⁾、アスペクト比が大きい場合には、凹壁面上の境界層内に流れ方向に軸を持つ縦渦列⁵⁾が形成される。したがって、これらの渦列の発生により凹壁面上の熱伝達が促進されることが期待される。P. D. McCormack ら⁶⁾は、曲りダクトを用いて凹壁面上に形成される Taylor-Görtler 渦が熱伝達に及ぼす効果について、解析ならびに実験的検討を行ない、これらの渦列によって凹壁面上の熱伝達が平板上のそれに比較して100~150%増加することを報告している。関ら^{7), 8)}は、作動流体として水を用い、返しバンド凹凸両面上の熱伝達特性について、等熱流束加熱の条件下で実験を行ない、ダクト高さや曲率半径の影響について検討している。しかしながら、さらに凍結を伴う場合の研究は少ないようである。

本研究は、アスペクト比が比較的大きな矩形断面を有する返しバンドを用いて凍結実験を行な

い、凸面上の凍結挙動および熱伝達挙動について検討したものである。

記号

C	: 流路高さ	m		ギリシャ文字
de	: 水力直径 $2C\ell/(C+\ell)$	m	θ	: 温度 °C
de*	: 修正水力直径	m	θ^*	: 無次元温度
De _{de}	: デーン数	$Ude/\nu_{in}\sqrt{de/R}$	λ	: 熱伝導率 W/mK
h	: 熱伝達率	W/m ² K	ν	: 動粘性係数 m ² /s
ℓ	: 流路幅	m	ψ	: 返しベンド入口よりの角度 deg
L _{step}	: ステップ形成位置	m	ϕ	: 偏角 deg
Nu	: ヌセルト数	$h(2C)/\lambda_{in}$ hde/λ_{in}	添字	
R	: 冷却面曲率半径	m	f	: 凍結界面
Re _{de} *	: 修正レイノルズ数	$U*de*/\nu_{in}$	i	: 凍結層
s	: 凍結層厚さ	m	in	: 返しベンド入口
U	: 流速	m/s	m	: 平均
			w	: 冷却面



- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| ① TEST SECTION | ⑪ WATER TANK |
| ② PUMP (WATER) | ⑫ HEAT EXCHANGER |
| ③ BYPASS VALVE | ⑬ PUMP (BRINE) |
| ④ CONTROLLING VALVE (WATER) | ⑭ BYPASS VALVE (BRINE) |
| ⑤ ORIFICE | ⑮ SLUICE VALVE (BRINE) |
| ⑥ MANOMETER | ⑯ DISTRIBUTOR |
| ⑦ CONTRACTED DUCT | ⑰ CONTROLLING VALVE (BRINE) |
| ⑧ DRAIN VALVE | ⑱ BRINE TANK |
| ⑨ STOP VALVE (WATER) | • THERMOCOUPLES |
| ⑩ SLUICE VALVE (BRINE) | |

図1 実験装置概要

CONVEX COOLED WALL						
C(mm)	17	50	9	26	52	98
λ (mm)	280	280	200	200	200	200
R(mm)	159	159	45	45	45	45

表1 試験部寸法

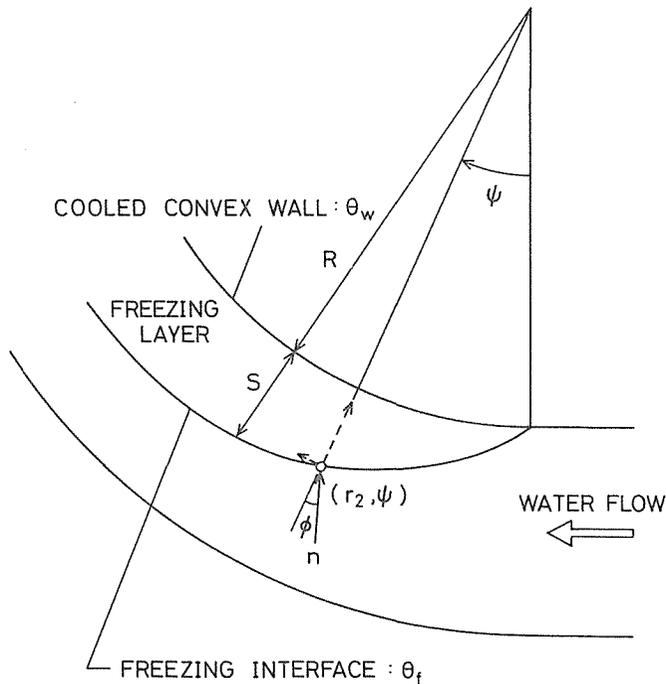


図2 熱伝達率算定座標

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概要を図1に示す。本実験装置は、作動流体として水を用いた水循環系統と、冷却液としてエチレングリコール水溶液を用いたブライン循環系統より構成されている。返しバンド凸面上の凍結熱伝達特性を検討するにあたり、表1に示すように6種類の試験部を作製した。冷却凸面は、厚さ3mmの銅板を半円筒形に加工し、冷却面温度測定のために、 $\phi 0.3\text{mm}$ の銅・コンスタンタン熱電対が流れ方向およびスパン方向に埋め込まれている。一方、凹面は断熱構造とした。冷却凸面背後には、冷却ノズルを設置し、各冷却ノズルより噴出するブライン量を分配器に取り付けたバルブにて調節することにより、冷却面が等温度となるように制御した。また、試験部入口および出口に熱電対を取り付け、流水温度の測定を行なった。試験部側面には返しバンド内の凍結状態が常時観察できるように、厚さ10mmの透明アクリル樹脂性板を用い、着脱可能な構造とした。

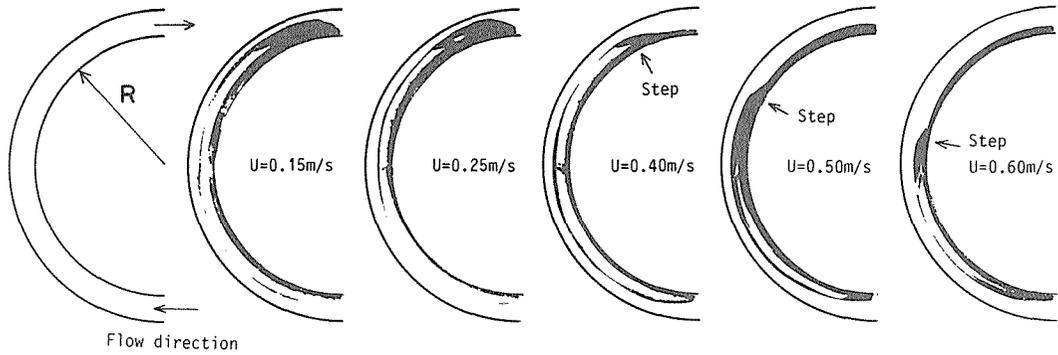


図3 凍結層形状 ($C=9\text{mm}$, $R=45\text{mm}$, $\theta_{in}=1^\circ\text{C}$, $\theta_w=-8^\circ\text{C}$)

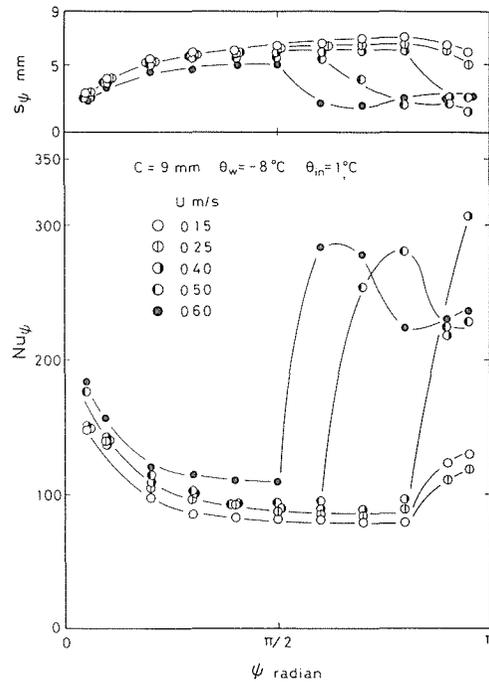


図4 局所ヌセルト数

2.2 実験方法

貯水槽より遠心ポンプにて吐出された水流は、オリフィスにて流量測定を行ない、縮流部、助走ダクトを通過後、試験部に流入し、再び貯水槽内に戻される。貯水槽内には水温を所定の温度に保つため熱交換器が設置されている。試験部入口水温が一定となった後、冷却凸面背後に取り付けられている冷却ノズルにブラインを供給し、冷却を開始した。実験は、凍結層成長後も試験部を通過する流量が変わらない状態で行なった。実験開始後、冷却凸面温度が一定となり、かつ凍結層厚さの変化ならびに凍結層の移動が1時間以上見られなくなった状態を定常状態とみなし、実験を終了した。また、熱伝達率の算定は、試験部内に成長した凍結層を写真撮影し、得られたネガフィルムをプロジェクターにより拡大し、凍結層を写し取る方法によった。

3. 熱伝達率の算定方法

凍結界面の熱伝達率の算定は、(1)凍結層円周方向へ熱伝導により移動する熱量、(2)凍結層内温度分布、(3)凍結界面法線方向、の3点を考慮した凍結界面の熱バランスにより求めることができる(図2参照)。凍結界面温度を0°Cと仮定し、辺点法⁹⁾を用いて凍結層内の温度分布を決定すれば、凍結界面法線方向の局所熱伝達率は次式により求めることができる。

$$h_{\psi} = \lambda_i \frac{(\theta_f - \theta_w)}{(\theta_{in} - \theta_f)} \frac{1}{R} \left[\frac{\sin \phi}{r} \frac{\partial \theta^*}{\partial \psi} \Big|_{r=r_2} + \cos \phi \frac{\partial \theta^*}{\partial r} \Big|_{r=r_2} \right] \quad (1)$$

ただし、 $\theta^* = (\theta - \theta_w) / (\theta_f - \theta_w)$

$$r = (R + s) / R$$

4. 実験結果および考察

4.1 凍結層形状および局所ヌセルト数

図3は、流路高さC=9mm、冷却面曲率半径R=45mmの場合、返しバンド凸面上に成長する凍結層に及ぼす流速の効果を示す。流速U=0.15および0.25m/sの条件では、流れ方向に沿う凍結層は返しバンド入口よりなめらかに厚く成長する単調な形状であるが、流速が早くなると(U=0.4, 0.5, および0.6m/s)、凍結層は返しバンド途中において急激に薄くなる、いわゆる“ステップ”と呼ばれる凍結層が観察された。また、このステップが形成される位置は、流速の増加に伴い返しバンド入口に向かって前進することがわかった。

図4には、縦軸に局所凍結層厚さおよび局所ヌセルト数、横軸に返しバンド入口よりの角度をとり、図3の結果を定量的に示してある。熱伝達が急激に増加する位置で、ステップが形成されている。流路高さ17mm、冷却面曲率半径159mmの場合における、返しバンド凸面上の凍結層および局所ヌセルト数をそれぞれ図5、図6に示す。先に示した図3の観察結果と同様に、この場合にもステップが形成され、第1ステップ形成位置は流速の増加とともに、入口方向に向かって前進している。さらに流速が増加し、U=0.6, 0.7m/sの場合には、第1ステップ下流側に第2ステップの形成が認められる。

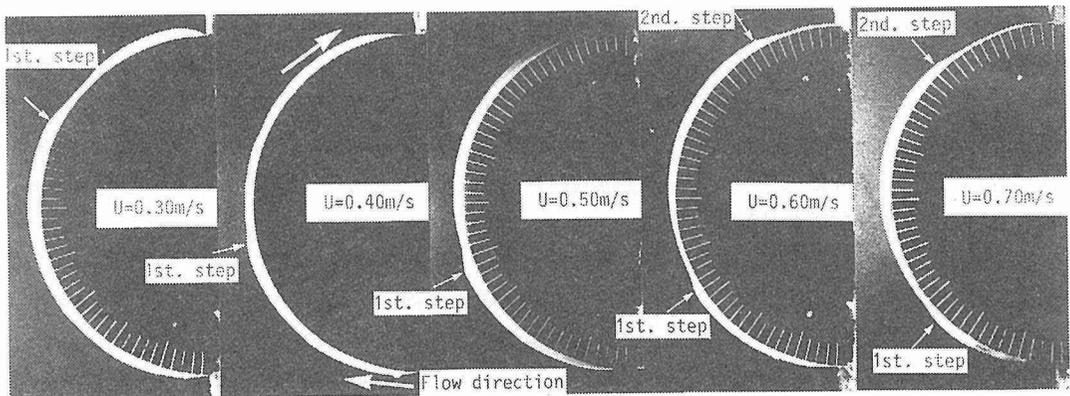


図5 凍結層形状(C=17mm, R=159mm, $\theta_{in}=1^{\circ}\text{C}$, $\theta_w=-10^{\circ}\text{C}$)

一般に、管路内の流れを伴う凍結現象では、ある条件下において流れ方向に沿い凹凸を持つ波状の凍結層¹⁰⁾へと形状が変化することが報告されている。このような凍結層の発生には、流速や冷却温度比、流路高さ、および曲率半径の他に、冷却面長さも関与しているものと考えられる。図5においては冷却面長さが長いので、流速が早い場合に2つのステップが観察されたものと思われるが、詳しくは4.4節にて後述する。

図3と同一の冷却面曲率半径45mmの下で、流路高さを変化させた場合の結果を図7～9に示す。それぞれ縦軸に局所凍結層厚さおよび局所ヌセルト数、横軸に試験部入口よりの角度をとり示す。いずれの図においても、全体的傾向として、流速が早くなるに従い熱伝達率は増加し、そのため凍結層厚さは減少している。また、図3および図5に見られたようなステップは、いずれの場合においても認められない。冷却面終端部付近での凍結層厚さの減少は、凍結層に沿う流れが凍結層末端部において剝離し、これが凍結層を後方から融解させた結果であるものと思われる。

図10は流路高さ50mm、冷却面曲率半径159mmの場合における凍結層形状を、図11は局所ヌセルト数を示したものである。流速 $U=0.05\text{m/s}$ では、凍結層は返しベンド入口より単調に増加しているが、流速が $0.1\sim 0.25\text{m/s}$ の範囲において、凍結層はステップ状となっている。しかしながら、ここで見られる凍結層は、凍結層終端部での凍結層厚さの急激な減少部が、時間経過とともに返しベンド上流側へ移動していく様子が観察されたことより、この場合のステップ状凍結層の発生原因は、先述したように凍結層終端部における凍結層界面に沿う流れの剝離に基づくものと考えられる。

図12はヌセルト数に及ぼす流入水温度の効果を示したものである。流入水温度の低下とともに、全体に熱伝達率は増加し、また第1ステップ形成位置は返しベンド入口方向に移動しているのがわかる。

4.2 ステップ形成原因について

図3、図5、および図12に見られるステップ状凍結層が形成される原因については、現在のところ、凍結層先端より発達する層流境界層が乱流へと遷移するためではないかと考えられており、これについての検証実験¹¹⁾も行われている。流水のある管路内で凍結が生ずる場合、凍結層は管路入口より下流に向かい、当初はなめらかに成長する。したがって、時間の経過とともに凍結面上の流れは下流に向かって加速され、これにより凍結層先端よりの層流境界層は乱流へと遷移し、その結果熱伝達率が増加し、凍結層の局所的な融解が生じ、ステップ状水層へと形状が変化していくものと思われる。図7～9でステップ状凍結層が観察されない理由は、流路高さに占める凍結層厚さの割合が小さいため、加速の効果が少ないことに加えて、冷却面長さも短く、境界層遷移へと移行するには到らないためと考えられる。一方、流水温度が低い場合には凍結層が成長し易く、そのため加速の割合も大きくなり、凍結層先端よりの層流境界層の乱流への遷移が促進され、図12に示したようにステップ形成位置が返しベンド入口に向かって前進するものと思われる。

4.3 ステップ形成位置の比較

図3、図5、および図10で得られた結果をもとに、ステップ発生位置と流速との関係を図13に示す。この図には、関ら¹²⁾の二平行平板間の凍結実験より得られた整理式を本実験条件に適用した結果も併記してある。流路高さ50mmの本実験結果は、従来よりのステップ形成原因に基づく現象ではないものと考えられるが、参考のためプロットした。流路高さ9mm、および17mmでの本実験で得られたステップ形成位置は、関ら¹²⁾のそれと比較して短くなっている。これは、返しベンド内の流れは遠心力の作用により主流速度が凹面方向にシフトした流れとなるため、凸面側の凍結面上では、流れが剝離し易くなることに起因しているものと思われる。

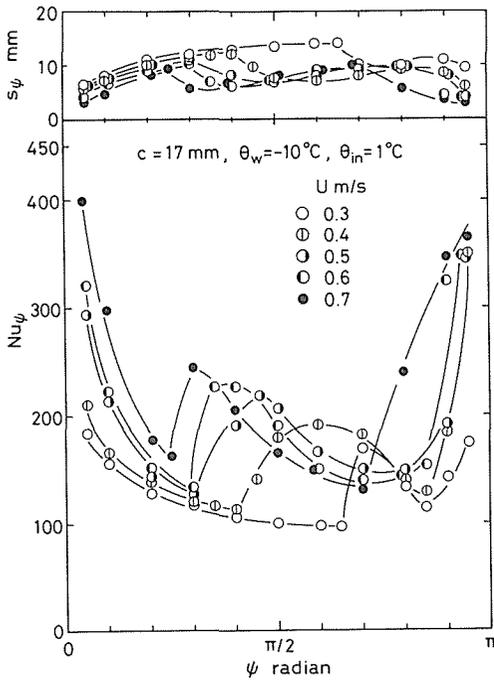


図6 局所ヌセルト数

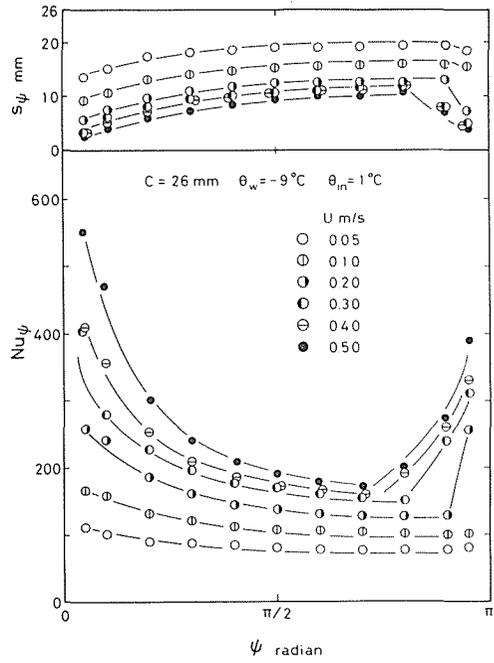


図7 局所ヌセルト数

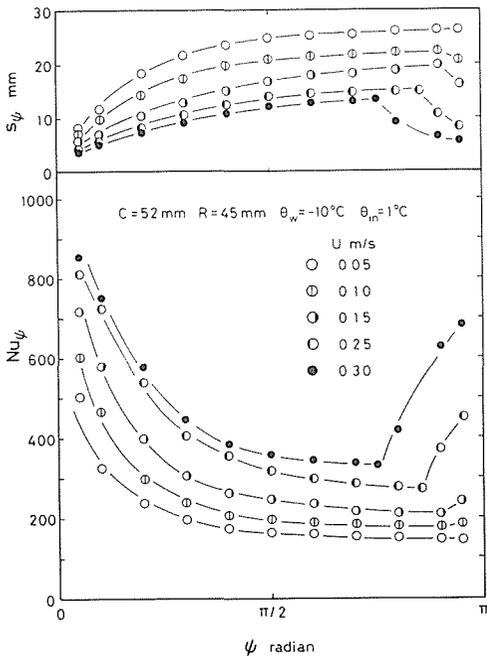


図8 局所ヌセルト数

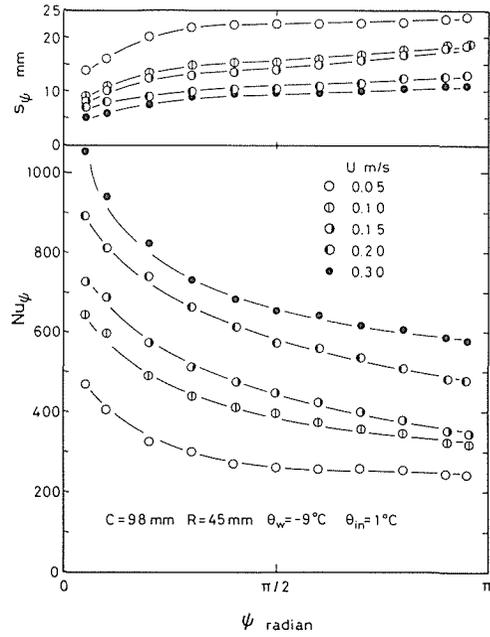


図9 局所ヌセルト数

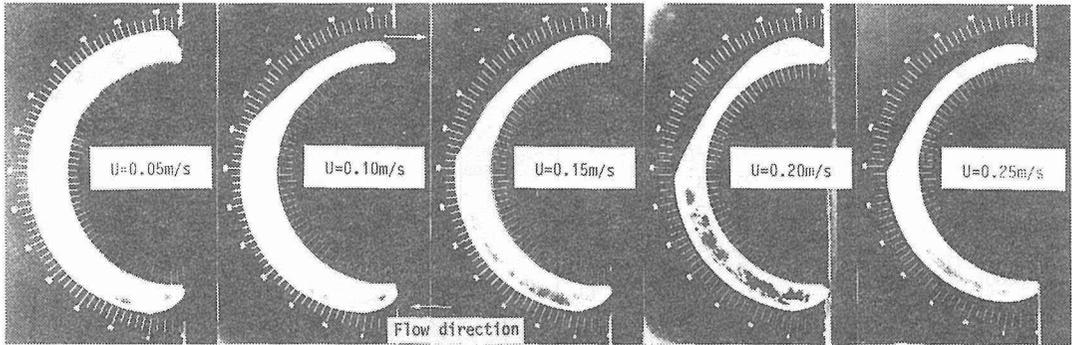


図10 凍結層形状 ($C=50\text{mm}$, $R=159\text{mm}$, $\theta_{in}=0.3^\circ\text{C}$, $\theta_w=-18^\circ\text{C}$)

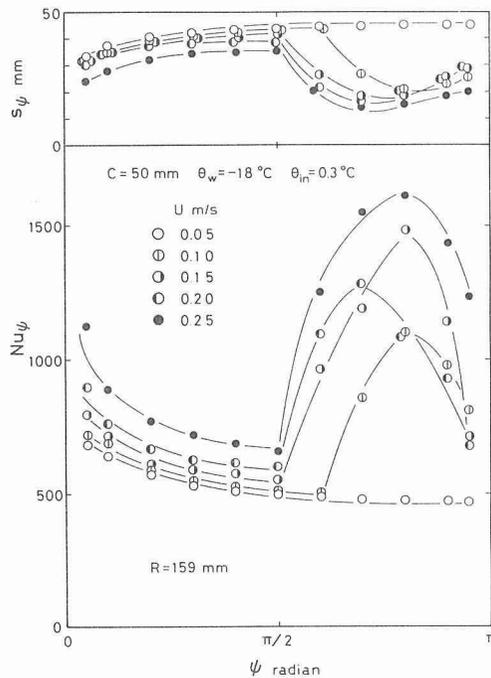


図11 局所ヌセルト数

4.4 ステップ形成位置の凍結層厚さ

図14は、縦軸に流路高さに占める最大凍結層厚さの割合、横軸に凍結層成長後の水力直径およびその位置における平均流速で評価した修正レイノルズ数を取り示したものである。ステップ状の凍結層が形成される場合には、ステップ発生位置の凍結層厚さが流路高さに占める割合を示している。平田ら¹³⁾は直行円管流路を用いて凍結実験を行ない、ステップ状の凍結層は、縮小部管路直径と冷却内管直径との比が0.8以下、すなわち、円管内に占める凍結層厚さの割合が、0.2以上において発生し、また管レイノルズ数 $Re_0 < 2300$ の範囲では、流れ方向に沿う凍結層はすべてステップ状となることを報告している。彼らの結果と一概に比較はできないが、本実験範囲におい

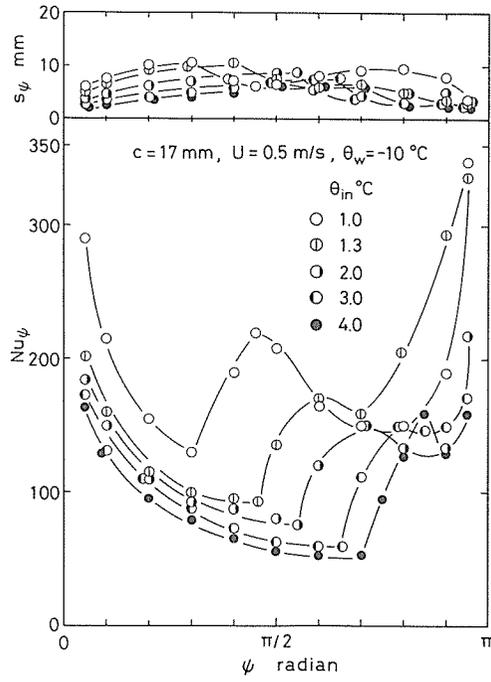


図12 局所ヌセルト数

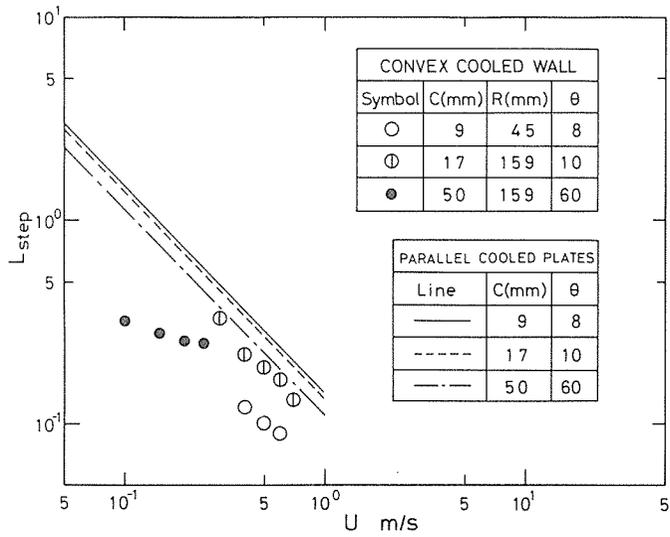


図13 ステップ形成位置

では、いずれの場合にも流路高さに占める凍結層厚さの比率が0.2以上であるにもかかわらず、かならずしもステップ状の凍結層は観察されなかった。さらに、流路高さ9 mmにおいては、いずれの条件においても、流路高さに占める凍結層厚さの割合が0.2以上であるものの、 $Re_{de}^* > 2300$ の範囲においてのみステップ状の凍結層が発生し、 Re_{de}^* が2300近傍の範囲では観察されなかった。

一般に、管内流れは $Re_D \approx 2300$ において、層流から乱流へと遷移することが知られているが、彼らは、管レイノルズ数 Re_D が小さい領域では、ステップ状の凍結層のみが形成されたと報告している。その原因については、管内流れが遷移レイノルズ数まで加速されるためには、下流に向いより厚い凍結層の発達が必要となり、そのため凍結層はステップ状へと形状変化するものと説明している。したがって、管レイノルズ数が小さい場合でも、遷移レイノルズ数にまで十分加速されるほど凍結層が厚く成長するか、あるいは十分な冷却面長さを有するならば、ステップ状凍結層が観察されるものと考えられる。流路高さ9 mmでのステップ状の凍結層が観察されなかった条件下では、流路高さに占める凍結層割合は比較的大きいものの、修正レイノルズ数 Re_{de}^* が2300近傍あるいはそれ以下であることから、冷却面長さが短いために遷移レイノルズ数まで加速されず、そのため凍結層はステップ状にはならないものと思われる。さらに図より、流路高さ50mmの場合には、 $Re_{de}^* = 2300$ の実験値のみがステップ状の凍結層とならないことがわかる。以上の事実より、ステップ状凍結層の形成原因に、境界層遷移に関与する凍結層厚さが密接に関係しているものと思われる。

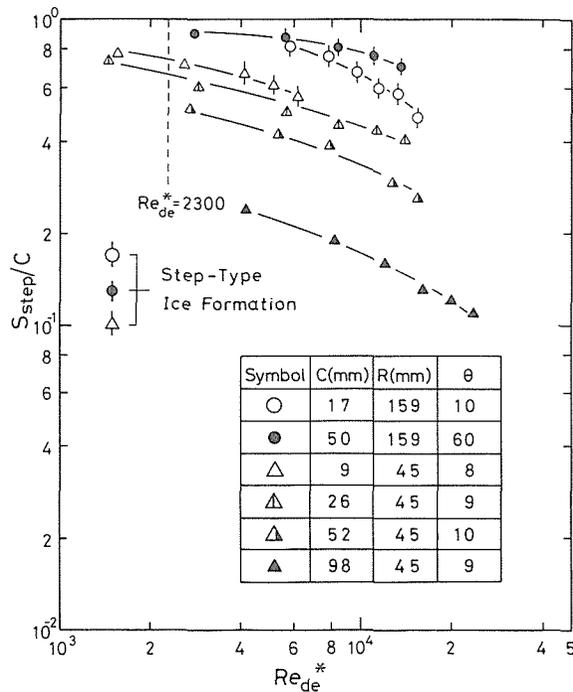


図14 流路高さに占める凍結層厚さの割合

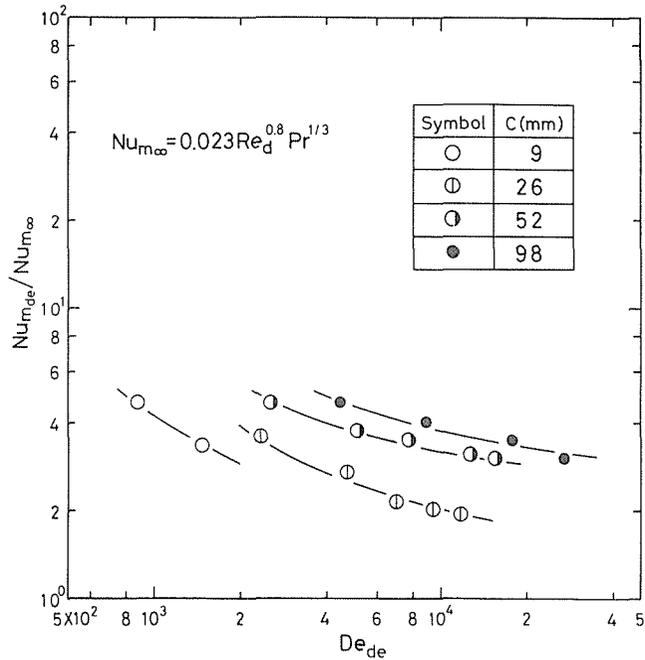


図15 平均熱伝達特性

4.5 平均熱伝達特性

ステップ状の凍結層が形成される場合、その位置の熱伝達率は局所的に著しく増大している。したがって、平均熱伝達率で返しバンド内の伝熱特性を評価することは必ずしも妥当とは言えないと考えられるので、凍結層が流れ方向に単調に成長している位置までの平均熱伝達特性について検討してみる。

図15は、Colburn¹⁴⁾による壁温一定の条件下で行われた、円管内乱流の平均熱伝達率実験整理式を用いて、返しバンド凸面での伝熱特性を示したものである。本実験結果は、いずれの流路高さにおいても良好な熱伝達特性 ($Nu_{mde}/Nu_{m\infty} > 1$) を示しているが、これは、凍結層成長に伴う流水加速の効果に加えて、冷却面の長さが短いことにより、温度助走区間の影響が顕著に現れるためと考えられる。さらに図より、流路高さが小さいほど、より優位な伝熱特性が得られることがわかる。これは、凍結層の発達に伴う流体加速の割合が、流路高さの減少とともに大きくなり、その結果熱伝達が促進されるためと考えられる。

5. 結 言

アスペクト比の大きな矩形断面を持つ凸面を冷却した返しバンドの凍結挙動について実験を行った結果、本実験範囲内で以下の事が明らかになった。

- (1) 凸面上には、ステップ状の凍結層が形成され易い。
- (2) 流速が早いほど、流入水温度が低いほど熱伝達は増加する。
- (3) 流路高さが小さいほど、良好な伝熱特性が得られる。

参考文献

- 1) S. V. Patankar ら : Journal of Fluid Mechanics, 67(1975), pp. 583-595.
- 2) L. S. Yao ら : Journal of Fluid Mechanics, 88(1978), pp.339-354.
- 3) P. Orlandi ら : ASME., J. Fluids Engineering, 101(1979), pp. 276-283.
- 4) A. M. O. Smith : Q. Appl. Math., 13-3(1955), pp. 233-262.
- 5) I. Tani ら : Z. A. M. P., 20(1969), pp. 609-618.
- 6) P. D. McCormack ら : Trans. ASME., J. Heat Transfer, 92(1970), pp. 101-112.
- 7) N. Seki ら : Wärme-und Stoffübertragung, 17(1982), pp. 17-26.
- 8) N. Seki ら : Trans. ASME., J. Heat Transfer, 105(1983), pp. 64-69.
- 9) 稲葉英男ら : 冷凍, 58(昭58-1), 663, pp. 13-21.
- 10) R. R. Gilpin : Trans. ASME., J. Heat Transfer, 103(1981), pp. 363-368.
- 11) 田子ら : 熱工学講演会講演概要集, 890-63(1989), pp. 70-71.
- 12) N. Seki ら : Trans. ASME., J. Heat Transfer, 106(1984), pp. 498-505.
- 13) T. Hirata ら : 日機論, 53(昭和62), 486, pp. 553-559.
- 14) 甲藤好郎 : 伝熱概論(昭55), p. 140, 養賢堂.