HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	返しベンド内凍結熱伝達挙動
Author(s)	田子, 真; 福迫, 尚一郎
Citation	北海道大學工學部研究報告, 135, 43-49
Issue Date	1987-05-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/42036
Type	departmental bulletin paper
File Information	135_43-50.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第135号（昭和62年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University. No. 135 (1987)

返しベンド内凍結熱伝達挙動

田子　真　福迫尚一郎

（昭和61年12月27日受理）

Freezing Heat-Transfer Characteristics in a Return Bend with a Rectangular Cross Section

Makoto TAGO and Shoichiro FUKUSAKO

(Received December 27, 1986)

Abstract

This report deals with an experimental study of freezing heat-transfer characteristics in a return bend with a rectangular cross section having a comparatively large aspect ratio. The experiments were mainly focused on the freezing heat-transfer behavior on a concave wall of the return bend, and was carried out with three kinds of duct height and curvature-radius under the condition that the concave wall of the return bend was cooled at uniform temperature maintained at less than freezing temperature, while the convex wall was insulated.

It was found from this experiment that the average freezing heat-transfer on the concave wall of the return bend increased both with increasing duct height and decreasing radius of the curvature.

1. 緒　　言

静止流体下における氷の生成などの凍結現象は古くから非定常熱伝導問題の一応用例として取り上げられ，その厳密解としてNeumann解あるいはStefan解があることはよく知られている。

一方，流水中で氷層が発生する場合など，強制対流下で凍結が生じる場合には，凍結層の成長が流れの様相に影響を及ぼし，そのため凍結界面における熱伝達率の変化を招くと同時に，また熱伝達率が変化することにより凍結層の形状が変化するなど極めて複雑な伝熱現象となり，現在のところ実験的研究が主として行なわれている。

強制対流下における凍結問題を取り扱った実験的研究として，円管内[1]，平板上[2]，二平行平板間[3]あるいは円柱まわり[4]などに関するものがあるが，この時生じる氷層形状については，流速，壁温および水温などの各種パラメータの相違により，流れ方向に沿いステップ状に，あるいはなめらかな凹凸状になることなどが報告されている。しかしながら，これらはいずれも直行流路における凍結現象を取り扱ったものである。

一方，曲り管の場合には，遠心力に基づく半径方向圧力勾配の不安定性によって，内部流の様

機械工学第二学科　伝熱工学講座

相は二次流れの発生によりさらに複雑になる。各種産業に見られる工業装置の多くは，垂直，水平，および曲り流路などの組み合わせにより構成されており，伝熱諸機器の小型化が要求されている現在において，曲り管内の熱伝達を解明することは工業上極めて重要である。

本報告は，曲り管の一つとして矩形断面を有する返しベンドを取り上げ，主にその外曲面上の凍結現象ならびに凍結熱伝達特性について実験的に検討したものである。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験装置

実験装置の概略および試験部をそれぞれ図1，図2に示す。本実験装置は主に作動流体である水回流部および冷却液回流部より構成され，流体はそれぞれ遠心ポンプにて循環させた。

流路高さおよび曲率半径が凍結挙動に及ぼす影響を調べるために，表1に示すように7種類の試験部を用いた。

冷却面にはいずれの場合も厚さ3mmの銅板を用い，冷却面温度測定のためにφ0.3mmの銅・コンスタンタン熱電対を埋め込んだ。

一方，他曲面は厚さ10mmの塩化ビニール管にて作製し，かつ断熱を施した。

試験部側面は，可視化のために厚さ10mmの透明アクリル板にて製作した。

冷却に際しては，外曲面冷却の場合，外曲面背後に設置された冷却液噴出ノズルより冷却液の噴き付けを行なうと同時に，冷却液に浸す方法をとった。また内曲面を冷却する場合には，内曲面は厚さ3mmの銅板で作製し，背後の密閉された冷却室内を冷却液が噴出しながら通過するという方法を用いた。

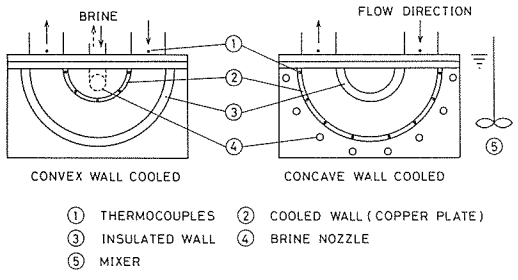

図2　試験部構造図

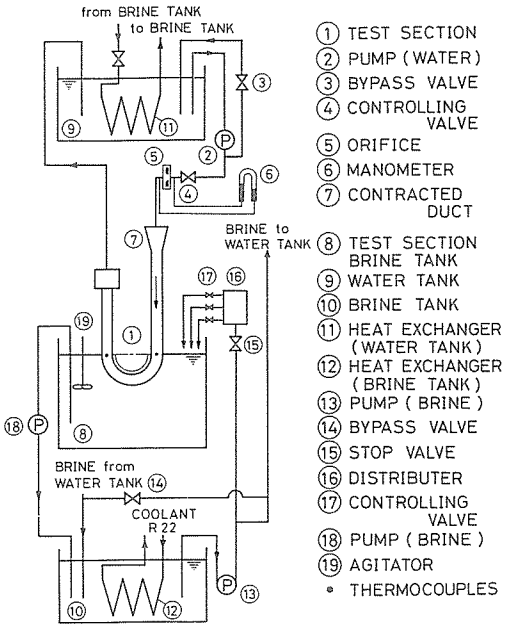

図1　実験装置系統図

表1　試験部寸法

Concave wall cooled			
c mm	l mm	R mm	R_o mm
97	200	150	101.5
60	200	150	120
45	200	150	127.5
30	120	136	121
30	120	87	72
30	120	68	53
Convex wall cooled			
c mm	l mm	R mm	R_o mm
26	200	45	58

2.2　実験方法

遠心ポンプにより水タンク内から吐出された水流は，あらかじめ検定されたオリフイスにて流量測定を行ない，縮流部，助走ダクトを通過後，試験部内に入り，再び水タンク内に戻した。

試験部入口水温が所定の温度となった後に冷却を開始し，冷却面上に氷層が発生した瞬間を実験開始時とみなした。実験開始後，時間間隔をおいて氷層厚さの写真撮影を行なった。

以上の方法により流量一定の条件にて実験を行ない，冷却面温度ならびに氷層厚さに変化が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。実験条件によっても異なるが，定常状態に達するまでに４～10時間を要した。なお，氷厚測定および氷層面垂直方向の角度の決定にあたっては，写真撮影したフイルムをプロジェクターにて拡大し，読み取る方法を採用した。

3.　熱伝達率の算定方法

凍結界面の熱伝達率を算定するためには，氷層内円周方向へ熱伝導で移動する熱量および氷層内温度分布を考慮しなければならない。稲葉ら[4]は流水中に置かれた円柱まわりの凍結実験を行ない，上記の事柄を考慮した凍結界面での熱伝達率を辺点法を用いて計算している。本報告では彼らの熱伝達率算定法を用いた。

これによると凍結界面垂直方向の熱伝達率は次式により求めることができる。

$$h_\psi = \lambda_1 \frac{(\theta_f - \theta_w)}{(\theta_{in} - \theta_f)} \left[\frac{\sin(\psi-\varphi)}{r} \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial \psi}\bigg|_r + \cos(\psi-\varphi) \cdot \frac{\partial \theta^*}{\partial r}\bigg|_r \right] \tag{1}$$

ただし，$\theta^* = (\theta - \theta_w)/(\theta_f - \theta_w)$，$\theta_f = 0$℃（凍結界面温度）

外曲面冷却の場合：$r = (R - S)/R$

内曲面冷却の場合：$r = (R + S)/R$

4.　実験結果および考察

4.1　外曲面凍結挙動に及ぼす流速の影響

図３には返しベンド外曲面上に発達した氷層形状を示してある。

実験条件は，流路高さ c＝30mm，冷却面曲率半径 R＝136 mm，冷却面温度 $\theta_w = -10$℃，流入水温度 $\theta_{in} = 1$℃である。図よりわかるように，氷層は返しベンド入口より流れ方向に沿って単調にその厚さを増すのではなく，ある位置 $\psi_{s\,min}$ において氷層は薄くなっており，またこの位置は流速の増加に従い，返しベンド入口方向に向って前進している。

図４には，局所氷層厚さならびに局所熱伝達率の変化を返しベンド入口よりの角度に対して示

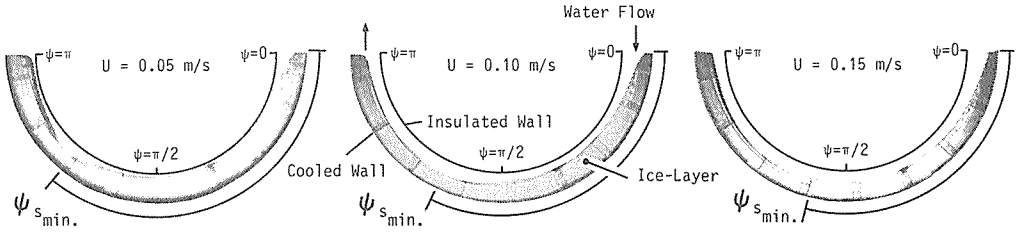

図３　氷層形状に及ぼす流速の影響（凹部冷却）c＝30mm，R＝136 mm，$\theta_w = -10$℃，$\theta_{in} = 1$℃

してある。図より，流速が増加するとともに全体的傾向として熱伝達率は大きくなり，その結果氷層厚さは減少しているのがわかる。

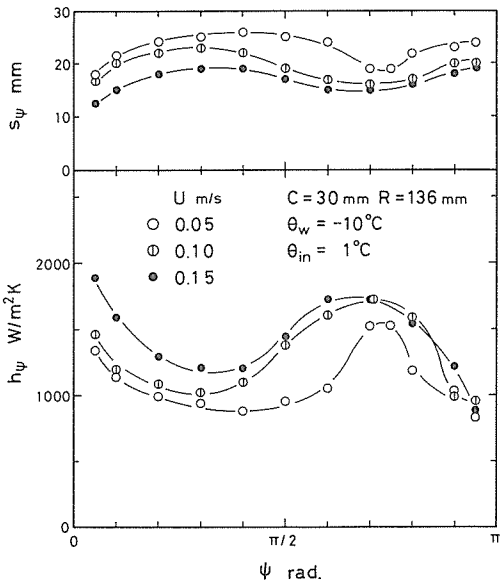

図4　局所氷層厚さおよび局所熱伝達率

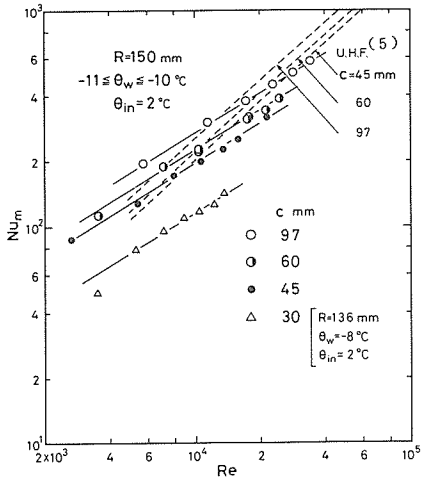

図5　平均ヌセルト数に及ぼす流路高さの効果

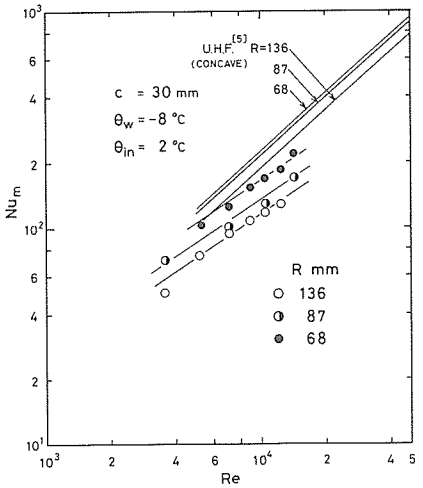

図6　平均ヌセルト数に及ぼす冷却面曲率半径の効果

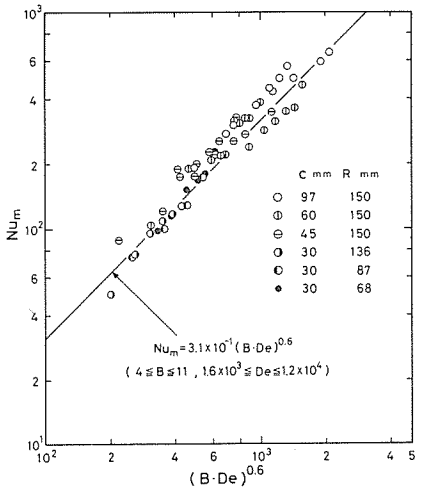

図7　平均ヌセルト数の相関関係

4.2　外曲面凍結挙動に及ぼす流路高さの影響

図5には，縦軸に返しベンド入口 $\psi=0$ から $9\pi/10$ (rad.) の範囲で評価した平均ヌセルト数，横軸にレイノルズ数をとり，凍結熱伝達に及ぼす流路高さの効果を示してある。冷却面終端部における氷層厚さの急激な減少は，末端効果によるものであるため，平均ヌセルト数の算定からは除外してある。図より明らかなように，流路高さの増加に従い平均ヌセルト数は大きくなっている。この現象は，流路高さ30mmの場合を除き，本実験装置は冷却面曲率半径が一定であるため，流路高さの増加は流路中心曲率半径の減少を招き，そのため返しベンド内の流れがより一層外曲面上に押し付けられる結果，熱伝達を増大させる効果と，いずれの場合も冷却面積が一定であるために，流路高さの増加に伴う流入熱容量増大の影響などの相乗効果によるものと思われる。また図には，等熱流束加熱下における返しベンド内熱伝達の実験整理式[5]を本実験条件に適用した結果を破線で示してある。いずれの場合も，流路高さの増加とともに平均

ヌセルト数は増大しているものの，おおよその傾向として，$Re<10^4$の比較的流速の遅い範囲においては，本実験結果は等熱流束加熱下のそれを上回っている。これは，本実験では流量一定であるために，初期流速が遅い場合には氷層が成長し易く，そのため返しベンド内の流速の増加を引き起こし，熱伝達を増大させる効果が大きくなるためと思われる。

4.3　外曲面凍結挙動に及ぼす曲率半径の影響

図6には，流路高さ30mmの場合の平均ヌセルト数に及ぼす冷却面曲率半径の効果を示してある。また図には，本実験条件を適用した等熱流束加熱下の実験整理式[5]の結果も併記してある。図より，いずれの場合にも冷却面曲率半径の減少に従い，平均ヌセルト数は増加しているのがわかる。これは，冷却面曲率半径が減少するに従い，流れはより外曲面上に押し付けられ，凍結面での摩擦係数が増大するためではないかと考えられる。

4.4　外曲面上の凍結熱伝達の実験整理式

返しベンド外曲面での凍結熱伝達率あるいは凍結厚さを把握し，予測することは工学的に非常に重要なことである。

図7は，外曲面における凍結熱伝達の無次元整理を行なったものである。外曲面の平均ヌセルト数は，本実験範囲内では次式によって整理できることがわかる。

$$Nu_m=3.1\times10^{-1}(B\cdot De)^{0.6} \qquad (2)$$

ただし，$4\leqq B\leqq 11$，$1.6\times10^3\leqq De\leqq 1.2\times10^4$

ここで，B　：冷却温度比$=(\theta_f-\theta_w)/(\theta_{in}-\theta_f)$

De：ディーン数$=\{U(2C)/\nu_{in}\}\cdot\sqrt{c/R}$。

4.5　内曲面凍結挙動に及ぼす流速の影響

内曲面に発達する凍結層および局所熱伝達率をそれぞれ図8および図9に示す。

実験条件は，流路高さ26mm，冷却面曲率半径45mm，冷却面温度－9℃，流入水温度1℃であり，流速をパラメータとして表示してある。

図より，流速の増加とともに熱伝達率は大きくなり，氷層は薄くなっているのがわかる。さらに，返しベンド入口よりなめらかにその厚さを増している氷層が，流速の増加に従い，冷却面終了端付近において急激に減少している。この原因については4.7節で考察することにする。

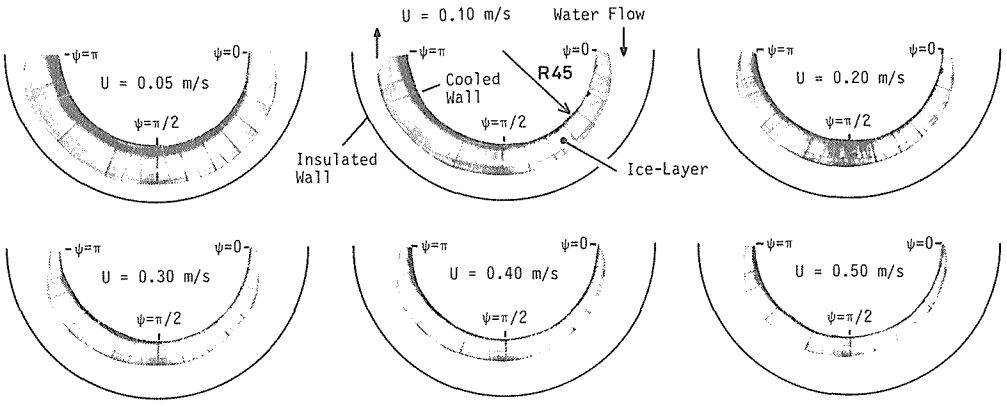

図8　氷層形状に及ぼす流速の影響（凸面冷却）c＝26mm，R＝45mm，$\theta_w=-9$℃，$\theta_{in}=1$℃

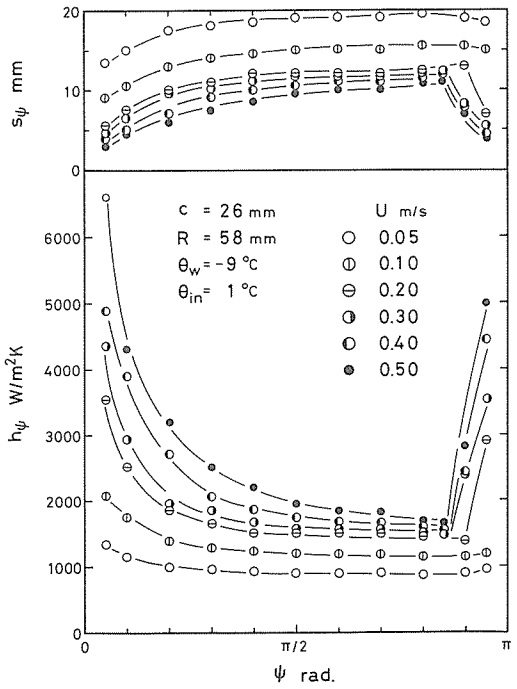

図9　局所氷層厚さおよび局所熱伝達率

4.6　返しベンド内熱伝達の比較

図10は，図8および9の結果を水力直径deを代表長さとする平均ヌセルト数とディーン数を用いプロットしたものである。またこの図には，比較のため，等熱流束加熱条件下での返しベンド外曲面[5]および内曲面[6]の熱伝達実験整理式を本実験条件に適用した結果を実線で，Deisslerによる円管内乱流熱伝達の解析結果[7]を破線で，また前節で導いた返しベンド外曲面の凍結熱伝達実験整理式を一点破線で示してある。

返しベンド外曲面と内曲面の凍結熱伝達を比較してみると，ディーン数がおよそ3×10^3以上においては外曲面の凍結熱伝達が内曲面のそれを上回っており，またこの傾向は，実線で示されている等熱流束加熱の結果と同様である。

また内外両曲面における本実験結果と等熱流束加熱のそれとを比較してみると，外曲面の場合には，ディーン数がおよそ9×10^3以下においては，本実験結果が等熱流束加熱下のそれを上回っている。これは，本実験は流量一定の条件で行なわれているため，氷厚の増加に基づく流速の増加が熱伝達に寄与する効果が大きいためと思われる。内曲面についても本実験範囲内では，凍結熱伝達の方が等熱流束加熱の結果を上回っており，このことも，上述と同様の原因によるものと思われる。しかしながら，外曲面，内曲面いずれの場合においても，流速が非常に大きくなり，氷層があまり発達しない場合には，氷厚の増加による流速増加の効果が期待できないため，凍結熱伝達は等熱流束加熱下での熱伝達を下回るようになるものと考えられる。

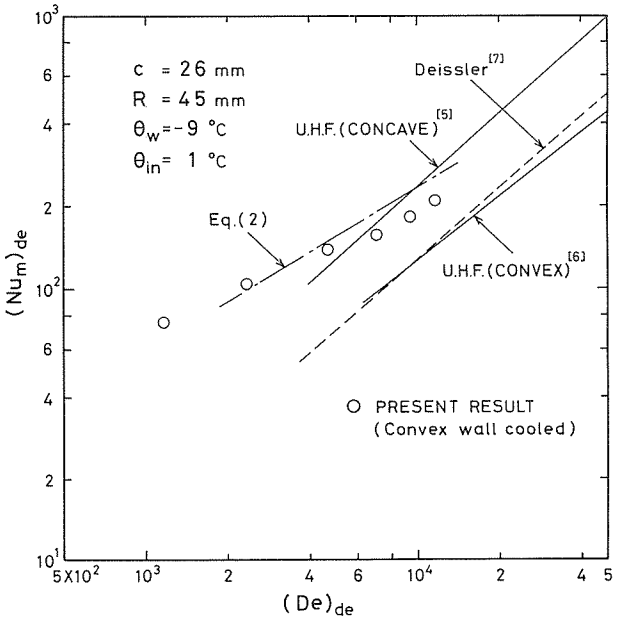

図10　平均ヌセルト数の比較

4.7　不連続氷層の形成原因

図3および図8の氷層形状写真に見られるように，氷層は冷却開始端より流れ方向に沿ってなめらかに成長しその厚さを増し続けるとは限ら

ない。しかしながら，氷層が流れ方向に沿って不連続となるためには，氷層がある程度厚く成長すること，冷却面が流れ方向に沿いある程度の長さを持つ必要があり，そのためには，流速，冷却面温度，流入水温度などの相互関係に何らかの条件が存在するものと考えられる。

関ら[3]は二平行平板間の凍結実験を行ない，氷層が不連続になるか否かの条件を見い出しているが冷却面長さについては言及していない。

さて，氷層が流れ方向に沿い不連続となる原因については，現在の所，氷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あると考えられている。したがって，乱流へと遷移した後は，外曲面冷却の場合には図3の氷層形状が示すように氷層は再び厚く成長する。しかしながらその遷移位置については，氷層界面近傍の流水は4℃における水の密度逆転により主流に較べ軽いため，流れ方向に沿って加速されるなどの原因により，通常の臨界レイノルズ数から予測される距離に比べ短くなるものと考えられる。

一方，図8で示した内曲面上での氷層形状についてみてみると，冷却面終了端近傍における氷層厚さの急激な減少は上述の要因に基づくものではないように思われる。すなわち，凍結面上に沿う流れが氷層後端において剥離し，これが氷層を後方より削り取るためではないかとも考えられるが今の所定かではなく，更に検討を要する問題である。

5. 結　　言

返しベンド内の凍結実験を行なった結果，本実験範囲内において，返しベンド外曲面の凍結熱伝達は，流路高さの増加および曲率半径の減少とともに大きくなることが分かった。

また内曲面の凍結熱伝達は，外曲面のそれに比較して小さな値をとるように思われるが，これについては更に詳細な検討を要するものと考えられる。

参考文献

1) R.R.Gilpin: Trans. ASME., J. Heat Transfer, 103 (1981), pp.363-368.
2) T.Hirata ら：Int. J. Heat Mass Transfer, 22 (1979), pp.1435-1442.
3) N.Seki ら：Trans. ASME., J. Heat Transfer, 106 (1984), pp.498-505.
4) 稲葉英男ら，：冷凍，58 (昭58-1), 663, pp.13-21.
5) N.Seki ら：Wärme-und Stofübertragung, 17 (1982), pp.17-26.
6) N.Seki ら：Trans. ASME., J. Heat Transfer, 105 (1983), pp.64-69.
7) 甲藤好郎：伝熱概論(昭55), p.121, 養賢堂.